

Sopot, dn. 16.09.2023

Dr hab. Monika Kędra, prof. IOPAN
Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk
Powstańców Warszawy 55
81-712 Sopot

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Marceliny Marii Ziółkowskiej
„Functioning of coastal benthic biotopes in the Puck Lagoon”
(“Funkcjonowanie przybrzeżnych biotopów bentosowych w Zalewie Puckim”)
wykonanej pod kierunkiem dr hab. Adama Sokołowskiego, prof. UG

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr Marceliny Ziółkowskiej opracowano na podstawie pisma z dnia 12.07.2023 roku, przesłanego przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki o Ziemi i środowisku Uniwersytetu Gdańskiego, prof. dr hab. Wojciecha Tylmanna wraz z dołączonym egzemplarzem rozprawy. Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została wykonana na Wydziale Oceanografii i Geografii Uniwersytetu Gdańskiego pod kierunkiem promotora dr hab. Adama Sokołowskiego, prof. UG.

Na rozprawę doktorską mgr Ziółkowskiej składają się streszczenie, wstęp, cele badawcze, lista publikacji składających się na dysertację, materiały i metody, wyniki z dyskusją, wnioski oraz literatura. Następnie, w pracy umieszczono trzy spójne tematycznie artykuły. Rozprawa poza polską wersją Streszczenia w całości napisana jest po angielsku. Całość pracy liczy 96 stron i zawiera ponadto spis treści, podziękowania i oświadczenia Autorów prac, informacje o źródłach finansowania oraz CV Autorki.

Publikacje składające się na rozprawę ukazały się w latach 2015-2022 w dwóch międzynarodowych recenzowanych czasopismach (łącznie IF: 7,803 i 240 pkt MEiN): Journal of Sea Research (IF: 2,287 i 70 pkt MEiN) oraz Estuarine Coastal and Shelf Science (IF: 3,229 i 100 pkt MEiN) i są to:

- I. Sokołowski A, Ziółkowska M, Zgrundo A, 2015. Habitat related patterns of soft-bottom macrofaunal assemblages in a brackish, low-diversity system (southern Baltic Sea). Journal of Sea Research 103: 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2015.06.017>
- II. Ziółkowska M, Sokołowski A, Richard P, 2018. Spatial and temporal variability of organic matter sources and food web structure across benthic habitats in a low diversity system (southern Baltic Sea). Journal of Sea Research 141: 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.05.007>

III. Ziółkowska M, Sokołowski A, 2022. Variation of food web structure in macrobenthic communities in low diversity system as determined by stable isotope-based community-wide metrics. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 274: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107931>

Z oświadczeń Autorki i Współautorów publikacji wynika, iż udział Doktorantki był rzędu 45 – 85 % i obejmował wszystkie etapy procesu badawczego: tj. sformułowanie koncepcji badań, pobór próbek, analizy laboratoryjne, analizę danych statystyczne i interpretację wyników, przygotowanie rysunków i tabel, napisanie manuskryptu, edycję tekstu i jego korektę, przygotowywanie odpowiedzi dla recenzentów oraz korespondencję z edytorem. Doktorantka jest drugą Autorką I publikacji i pierwszą Autorką II i III publikacji; jest Autorką korespondencyjną w każdej z publikacji. W mojej opinii udział Doktorantki w badaniach, analizach i powstaniu publikacji jest znaczący i uzasadniony.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska wpisuje się w nurt współczesnych badań ekologicznych dotyczących funkcjonowania zbiorowisk makrozoobentosu i badań sieci troficznych. Doktorantka w przedstawionej pracy skoncentrowała się na sezonowej zmienności zbiorowisk makrozoobentosu w różnych typach siedlisk w płytkich obszarach Zalewu Puckiego, w tym ich bioróżnorodności, struktury i funkcjonowania (sieci troficzne) w powiązaniu z szeregiem parametrów środowiskowych, biotycznych i abiotycznych. W pracy zastosowano połączenie tradycyjnych metod badawczych z wynikami modeli statystycznych, tj. bayesowskich modeli mieszanych stabilnych izotopów węgla i azotu $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{15}\text{N}$. Zastosowanie stabilnych izotopów do badania sieci troficznych jest metodą znaną od dość dawna i często stosowaną w morskich badaniach troficznych. Również coraz częściej badania te łączy się z badaniami bioróżnorodności i funkcjonowania ekosystemów. Tego typu badania uwzględniające rolę makrozoobentosu są coraz częściej prowadzone, jednak nadal stanowią niezwykle ważne zagadnienie w poszerzaniu naszej wiedzy o funkcjonowaniu organizmów oraz interakcji pomiędzy organizmami a środowiskiem, a także są istotne z punktu widzenia ochrony środowiska i zarządzania zasobami morskimi. Badania struktury zbiorowisk bentosu i ich bioróżnorodności oraz relacji troficznych są szczególnie istotne w badaniach płytkich przybrzeżnych rejonach, gdzie procesy biogeochemiczne zachodzące na dnie oraz obieg węgla (materii organicznej) są bardzo intensywne, a rola bentosu w tych procesach - znacząca. Badania prowadzone w ujęciu sezonowym są tym cenniejsze, że pozwalają na pełniejsze rozpoznanie procesów zachodzących w ciągu roku, a tym samym rozpoznanie zmienności zbiorowisk bentosowych w dłuższym okresie czasu i ich roli w ekosystemie morskim. Ponadto, szeroko rozumiane badania dotyczące funkcjonowania ekosystemów są ważnym zagadnieniem

w kontekście zachodzącej zmiany klimatu i jej konsekwencji, na które wyjątkowo mocno narażone są płytkie przybrzeżne rejony, dodatkowo znajdujące się pod silnym wpływem antropopresji. Tego typu badania w południowej części Bałtyku, a szczególnie w Zatoce Puckiej, są bez wątpienia potrzebne. Stąd uważam, że podjęta w rozprawie tematyka dotycząca zmienności bioróżnorodności, struktury i funkcjonowania przybrzeżnych zbiorowisk bentosowych jest istotna z punktu widzenia ekologii i funkcjonowania ekosystemów morskich, i przede wszystkim z punktu widzenia poszerzania naszej wiedzy o funkcjonowaniu i roli zespołów bentosowych w Zalewie Puckim, obszarze o znacznych walorach przyrodniczych.

Merytorycznie nie mam zastrzeżeń do publikacji wchodzących w przedmiotową do recenzji dysertację, których naukowa jakość została zweryfikowana na etapie recenzji w czasopiśmie, w których prace te zostały opublikowane. Nie widzę istotnych uchybień metodycznych czy w interpretacji wyników, które zasługiwałyby na uwypuklenie. Poniżej wraz z uwagami do poszczególnych części rozprawy wymieniam jednak kilka pytań do dalszej dyskusji, które nasunęły się po lekturze prac.

Wszystkie przedstawione publikacje stanowiące podstawę rozprawy doktorskiej są spójne tematycznie i metodycznie, co jest w przejrzysty sposób pokazane we Wstępie. We Wstępie podkreślono również elementy nowości pracy z uwzględnieniem dotychczas prowadzonych badań. Autorka skupiła się przede wszystkim na badaniach prowadzonych w Morzu Bałtyckim czy wręcz ograniczyła się do Zatoki Puckiej. Tymczasem warto byłoby pokazać własne prace z Zalewu Puckiego szerzej, również na tle badań prowadzonych w innych obszarach geograficznych. Takie podejście pozwala na pełniejszy opis zjawisk oraz poznawanie mechanizmów w ogóle, a nie tylko w konkretnie badanym środowisku. Przy opisywaniu metody stabilnych izotopów $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{15}\text{N}$ mgr Ziółkowska cytuje literaturę, która leży u podstaw tej metody. Ponieważ w ciągu ostatnich lat nasza wiedza w tym zakresie znacznie się zwiększyła warto byłoby zacytować tutaj również nowsze prace oraz te odnoszące się do organizmów morskich i konkretnie bentosu. Z mojego punktu widzenia warto byłoby tutaj umieścić więcej informacji o roli jaką w środowisku i w sieciach troficznych pełnią organizmy bentosowe, a także o znaczeniu rodzaju i ilości materii organicznej dla funkcjonowania zbiorowisk bentosowych. Cele naukowe pracy wymienione są na końcu Wstępu, a w kolejnym rozdziale: Cele naukowe pracy, sformułowano trzy hipotezy badawcze wraz z siedmioma hipotezami szczegółowymi. Hipotezy znalazły się w drugiej i trzeciej publikacji, ale nie są wymienione w pierwszej. O ile pierwsza hipoteza jest bardzo prosta, nawet oczywista, to kolejne są już bardziej rozbudowane i dobrze przemyślane. Zamieszczony w części Materiały i metody Opis rejonu badań jest bardzo zdawkowy – uważam, że przydałoby

się tutaj więcej informacji o Morzu Bałtyckim oraz o Zatoce Puckiej, które pozwoliłyby umieścić Zalew i badane siedliska na tle całego akwenu, i ogólnie - w szerszym kontekście ekologicznym. Kolejne rozdziały rozprawy doktorskiej są w zasadzie rozszerzonym streszczeniem trzech publikacji i stanowią pewnego rodzaju powtórzenie informacji, które później są osobno sformułowane w każdej z nich, jednak podanych w sposób integrujący i wiążący wyniki całej rozprawy doktorskiej. W tej części pracy, szczególnie w częściach 1-6, znalazło się trochę drobnych błędów edytorskich czy interpunkcyjnych, które jednak nie mają wpływu na odbiór całości tekstu. Po wnioskach, które w precyzyjny sposób podsumowują wykonaną pracę, umieszczono spis bogatej literatury (86 pozycji), zarówno tej najnowszej jak i starszej, co wskazuje na dobrą znajomość literatury przedmiotu. Dodatkowo kolejne pozycje cytowane są w poszczególnych publikacjach.

Celem pierwszej publikacji (Sokołowski i in., 2015) było określenie geograficznej i czasowej zmienności zbiorowisk makrofauny w odniesieniu do typu siedliska. Wyniki pracy oparte są o pięciokrotny, sezonowy pobór próbek makrozoobentosu oraz makrofitów na czterech stacjach, w różnych rejonach Zalewu Puckiego. Zebrane materiały stanowią podstawę tego oraz kolejnych artykułów. Doktorantka wykazuje, że przestrzenna zmienność struktury zgrupowań makrobentosu jest zależna od czynników biotycznych i abiotycznych, szczególnie od biomasy i składu gatunkowego makrofitów, głębokości i jakości pożywienia (jakości materii organicznej w powierzchniowym osadzie). Ponadto, udowadnia, że nawet na niewielkim obszarze Zalewu Puckiego, mimo podobnych warunków hydrologicznych oraz podobnego typu osadu, zmienność zgrupowań bentosu może być znacząca, a wartość przyrodnicza - wysoka. W odniesieniu do tej publikacji mam kilka pytań, głównie dotyczących aspektów metodologicznych. Nie jest dla mnie jasne w jaki sposób zostały wybrane stacje badawcze – czy na podstawie rodzaju osadu i występującej w danym obszarze roślinności czy na podstawie wstępnej klasyfikacji Gic-Gruszy i in. (2009), a może dzięki połączeniu tych dwóch podejść? Czy wybór stacji był podyktowany chęcią zbadania makrofauny w czterech różnych (wybranych *a priori*) siedliskach czy również miał na celu potwierdzenie podziału zaproponowanego przez Gic-Gruszę i in. (2009)? Mszywiolę zostały potraktowane jako jeden organizm – czy nie lepiej byłoby wyłączyć organizmy kolonijne z analizy? Czy biomasa została określona dla każdego taksonu osobno? W jaki sposób z czerpacza van Veena pobrano górną warstwę 10 cm osadu (a pozostałą część wyrzucono)? Rozumiem, że wybór głównego narzędzia badawczego był podyktowany jego dostępnością oraz możliwościami jednostki badawczej (Łódź?), ale proszę o komentarz czy nie lepszym wyborem byłby czerpacz skrzynkowy typu „box corer”. W tej części pracy pojawia się określenie „mikroskala”

w odniesieniu do siedlisk bentosowych – co dokładnie oznacza mikroskala dla badań prowadzonych na czterech stacjach, na jednak dość dużej części obszaru Zalewu Puckiego? Podsumowując, publikacja I przedstawia szczegółowo charakterystykę badanych zbiorowisk bentosowych oraz ich siedlisk, dzięki czemu jest ważnym wprowadzeniem i podstawą dla pełnego zrozumienia kolejnych części pracy doktorskiej i całościowego badania funkcjonowania przybrzeżnych biotopów bentosowych w Zalewie Puckim.

Celem drugiej publikacji (Ziółkowska i in., 2018) było określenie w jaki sposób zmieniają się bentosowe sieci troficzne w zależności od badanego siedliska i w różnych porach roku. W pracy zweryfikowano postawione hipotezy i stwierdzono, że organizmy bentosowe zasiedlające różne siedliska charakteryzują się określonym składem izotopowym $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{15}\text{N}$, który odpowiada określonym i zidentyfikowanym przez Doktorantkę źródłom pożywienia, różnym w zależności od siedliska i pory roku. Określono również wpływ zróżnicowanych źródeł materii organicznej na strukturę sieci troficznej i wykazano, że organizmy bentosowe korzystały przede wszystkim z dostępnych lokalnie źródeł materii organicznej. Kluczowymi czynnikami wpływającymi na strukturę sieci troficznych były jakość materii organicznej w osadzie, rodzaj i biomasa makrofitów oraz obecność rzecznej materii organicznej. Doktoranta zidentyfikowana również główne szlaki przepływu strumieni energii w sieci troficznej dla każdego z zespołów bentosu i wskazała na ważną rolę filtratorów, przede wszystkim w rejonach piaszczystych, korzystających głównie z fitoplanktonu i zawieszanej materii organicznej jako kluczowych źródeł pożywienia, a także na rolę organizmów wszystkożernych i detrytusożerców, głównie w rejonach położonych bliżej ujścia rzeki, korzystających z kolei z materii organicznej w osadzie (detrytusu). W mojej ocenie jest to ciekawa praca, tym cenniejsza, że bierze pod uwagę zmienność sezonową bentosowych sieci troficznych, jak również obejmuje bardzo szerokie spektrum badanych organizmów – od meiofauny poprzez organizmy makrobentosowe do ryb bentosowych. W badaniach wzięto pod uwagę dużo bardzo różnych potencjalnych źródeł materii organicznej: od zawieszanej materii organicznej i fitoplanktonu po materię organiczną w osadzie i szereg różnych typów roślinności morskiej. Tutaj nasuwa mi się pierwsze pytanie o różnice w składzie izotopowym $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{15}\text{N}$ fitoplanktonu dla różnych stacji badawczych – czy wiadomo z czego ta różnica wynikała i czy na przykład w różnych badanych siedliskach skład gatunkowy zakwitu był znacząco różny (mimo relatywnie niewielkiej odległości pomiędzy badanymi stacjami)? Czy wszystkie zebrane (na potrzeby publikacji I) organizmy były później analizowane pod kątem stabilnych izotopów $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{15}\text{N}$? Zakładam, że nie dla wszystkich taksonów było możliwe zebranie wystarczającej ilości materiału do analiz – jak bardzo reprezentatywne dla całego zbiorowiska były organizmy

wybrane do analiz troficznych? Czy skład izotopowy $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{15}\text{N}$ poszczególnych gatunków makrofitów był znacząco różny? Prosiłabym również o komentarz dotyczący różnic pomiędzy badanym fitoplanktonem a zawieszoną materią organiczną – jak dużą część zawieszonej materii organicznej mogły stanowić mniejsze frakcje fitoplanktonu i jaki to mogło mieć wpływ na interpretację wyników? W pracy zbadano nicienie jako przedstawicieli meiofauny – czy w próbkowanych osadach znajdowali się również inni przedstawiciele meiofauny (ale w za małych ilościach dla badań stabilnych izotopów) czy też meiofauna była całkowicie zdominowana przez nicienie? W pracy mgr Ziółkowska podaje, że wiosną w siedlisku C łańcuch troficzny był krótszy niż w innych obszarach i porach roku (Rys. 5) – proszę o komentarz co może być tego przyczyną. W wynikach (Tabela 6) znalazła się informacja, że *Cerastoderma* w diecie ma zimą większy udział fitoplanktonu niż zawieszonej materii organicznej (siedlisko A), co jest przykładem odwrotnego niż w większości innych przypadków trendu – proszę o komentarz dotyczący potencjalnych przyczyn. Na koniec uwaga techniczna – w drukowanej wersji rozprawy doktorskiej Rysunek 2 jest mało czytelny (bardzo słaba jakość wydruku).

Celem III publikacji (Ziółkowska i in., 2022) było rozpoznanie i porównanie struktury sieci troficznych fauny bentosowej, w tym różnorodności i redundancji troficznej przy użyciu opartych na $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{15}\text{N}$ wskaźników troficznych („community-wide metrics”) w czterech różnych siedliskach w Zalewie Puckim oraz ocena udziału różnych źródeł pożywienia w diecie dominujących gatunków bentosu. W pracy zweryfikowano postawione hipotezy i stwierdzono, że poszczególne zbiorowiska różniły się między sobą pod względem różnorodności troficznej: zbiorowiska z piaszczystego dna z niewielką biomasą roślinności były zdominowane przez filtratorów, korzystały z jednego dominującego zasobu materii organicznej, tj. fitoplanktonu i zawieszonej materii organicznej i charakteryzowały się uproszczoną strukturą troficzną. Z kolei zbiorowiska zasiedlające obszary, w których występowała duża biomasa roślinności, korzystały ze zróżnicowanych zasobów pożywienia, co powodowało zwiększenie zróżnicowania nisz pokarmowych i zwiększenie stabilności sieci troficznych. W pracy wykazano, że struktura sieci troficznych zmieniała się przestrzennie i sezonowo, a bogactwo gatunkowe było pozytywnie skorelowane z większą ilością dostępnych źródeł materii organicznej i długością łańcucha troficznego, a negatywnie z redundancją troficzną i różnorodnością troficzną. Innymi słowy Doktorantka wykazała, że zbiorowiska, w których występuje duże bogactwo gatunkowe korzystają z bardziej różnorodnych zasobów materii organicznej, co sprzyja stabilności relacji pokarmowych. Ważnym wynikiem jest z pewnością wykazanie, że obecność makrofitów zwiększa różnorodność troficzną, ale same rośliny pełnią raczej rolę inżynierów środowiska niż

źródła pokarmu. Nie mam dalszych pytań do tej części pracy – artykuł jest bardzo ciekawy, opiera się na ciekawym materiale badawczym (podobnie jak poprzedni) i wykorzystuje dobrze dobrane metody analizy, w tym bayesowskie modele mieszane. Bardzo cenne jest tutaj ujęcie sezonowe, a wyniki, jak słusznie zauważa mgr Ziółkowska, mają znaczenie dla potrzeb zarządzania strefą płytkowodną oraz dla ochrony środowiska.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionej rozprawy zaliczyłabym: określenie zmienności przestrzennej i sezonowej zbiorowisk bentosowych i struktury ich sieci troficznych; zidentyfikowanie różnorodnych źródeł pożywienia i ich zmienności geograficznej i czasowej; określenie udziału poszczególnych rodzajów pokarmu w diecie fauny bentosowej; oraz rozpoznanie roli różnorodności taksonomicznej bentosu w kształtowaniu struktury troficznej. Doktorantka podkreśla, że otrzymane wyniki są istotne z punktu widzenia ochrony środowiska i zarządzania. W mojej ocenie stanowią również istotny wkład w naszą wiedzę dotyczącą bioróżnorodności i relacji pokarmowych (funkcjonowania) zbiorowisk bentosowych oraz ich zmienności sezonowej i przestrzennej w płytkich, pokrytych roślinnością morską obszarach przybrzeżnych. Tym samym otrzymane przez mgr Ziółkowską wyniki przyczyniają się do lepszego rozpoznania obiegu materii i przepływu energii w przybrzeżnych ekosystemach morskich.

Podsumowanie:

Wyżej wymienione uwagi i pytania nie wpływają negatywnie na merytoryczną ocenę pracy doktorskiej. Rozprawa doktorska mgr Marceliny Ziółkowskiej jest oryginalnym opracowaniem reprezentującym wysoki poziom merytoryczny i nowość naukową z dobrze sformułowanymi wnioskami. Postawiony cel badawczy został osiągnięty, Doktorantka weryfikuje postawione hipotezy badawcze, a uzyskane wnioski oceniam jako ważne z punktu widzenia ekologii morza.

W związku z powyższym stwierdzam, iż przedłożona rozprawa spełnia wymogi formalne i ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Składam niniejszym wniosek do Rady Dyscypliny Nauki o Ziemi i środowisku Uniwersytetu Gdańskiego o dopuszczenie mgr Marceliny Ziółkowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

