

Toruń, 1.12.2023 r.

Prof. dr hab. Piotr Hulisz
Katedra Gleboznawstwa i Kształtowania Krajobrazu,
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr Marty Składowskiej pt. „Metody remediacji *in situ* z wykorzystaniem naturalnych właściwości skał oraz organizmów żywych”.

Recenzję wykonano na zlecenie Dyrektora Instytutu Nauk o Ziemi Wydziału Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach dr hab. Ewy Łupikaszy, prof. UŚ (pismo z dnia 22.09.2023 roku). Rozprawa doktorska była realizowana w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy w porozumieniu z firmą GBA POLSKA Sp. z o.o., pod opieką naukową prof. dr. hab. Leszka Marynowskiego. Opiekunem przemysłowym był dr Leszek Majgier.

1. Uzasadnienie wyboru tematu pracy oraz cel badań

Pani mgr Marta Składowska w swojej rozprawie podjęła badania, których celem było opracowanie na drodze doświadczalnej lepszych lub zoptymalizowanie obecnie stosowanych metod remediacji *in situ* zanieczyszczonej gleby z wykorzystaniem naturalnych właściwości skał i organizmów żywych, głównie roślin. Obiektem badań były gleby zanieczyszczone substancjami ropopochodnymi oraz metalami ciężkimi. Wybór tematyki badawczej uważam za trafny i uzasadniony. Badania te są kluczowe w kontekście oceny skutków oddziaływania czynników antropogenicznych i technogenicznych, w tym stopnia przekształcenia gleb oraz procesów prowadzących do ich degradacji. Jest to niezbędne do podjęcia właściwych i skutecznych działań remediacyjnych. Ważne są w tym przypadku także relatywnie niskie koszty oraz łatwość zastosowania samej metody. Właściwa diagnoza gleb zanieczyszczonych oraz dobór metod usuwania lub unieruchamiania szkodliwych substancji bywa bardzo trudnym zadaniem. Konieczna jest bardzo szeroka analiza problemu, co często wymusza zastosowanie podejścia interdyscyplinarnego.

2. Struktura pracy

Treść zawarta w rozprawie odpowiada pod względem merytorycznym tytułowi pracy, który ma charakter problemowy. Układ pracy jest zgodny z zasadami pracy naukowej i odpowiada wymaganiom stawianym tego typu opracowaniom. Rozprawę przygotowano z zachowaniem właściwych proporcji objętościowych pomiędzy jej poszczególnymi częściami. Tom obejmuje łącznie 128 stron wydruku komputerowego. Tekst uzupełnia 36 rysunków i 15 tabel. Na końcu pracy dołączono streszczenie w języku angielskim.

Całość pracy została podzielona na 9 rozdziałów, do których Doktorantka zaliczyła niepotrzebnie spis literatury. Nie mam istotnych zastrzeżeń dotyczących hierarchicznego układu treści oraz tytułów rozdziałów i podrozdziałów. Należy podkreślić, że struktura treści w rozdziałach prezentujących wyniki badań (5), ich dyskusję (6), a także opisujące procedurę opracowanych metod remediacji (7) jest logiczna i bardzo dobrze odzwierciedla przyjęte podejście badawcze.

3. Merytoryczna i formalna ocena pracy

3.1. Zakres badań oraz przyjęte metody badawcze

Zakres badań przedstawiony na s. 30 jest bardzo szeroki i obejmował: przegląd literatury dotyczący zagadnienia remediacji *in situ* gleb zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi oraz metalami ciężkimi, wytypowanie powierzchni badawczych do doświadczenia polowego, wytypowanie terenu zanieczyszczonego w celu pobrania próbek gleby do eksperymentu laboratoryjnego na poletkach badawczych, laboratoryjne analizy fizykochemiczne materiału glebowego poddawanego procesom remediacyjnym, wybór gatunków roślin do wykorzystania w procesie fitoremediacji gleby zawierającej wysokie stężenia substancji ropopochodnych i metali ciężkich, wybór biopreparatu do zastosowania w bioremediacji gleby skażonej substancjami ropopochodnymi, wybór oraz opracowanie doboru dawek dodatków doglebowych do zastosowania w celu fitostabilizacji metali ciężkich w glebie, określenie zmian stężeń substancji ropopochodnych i metali ciężkich w glebach poddanych remediacji *in situ* oraz ocenę efektywności procesów remediacji *in situ* prowadzonych w warunkach poligonowych oraz laboratoryjnych, na podstawie zaobserwowanych zmian stężeń związków degradujących badane gleby przy wykorzystaniu laboratoryjnych metod fizykochemicznych.

Szczególnie przydatne dla zrozumienia zastosowanego przez Autorkę podejścia badawczego jest klarowne przedstawienie schematu zawierającego poszczególne etapy badań

na rys. 2 (s. 31). Należy zwrócić uwagę, że stosowanie tak wielu metod może niekiedy skutkować „rozmyciem się” głównego celu badawczego. W tym przypadku prezentowane podejście jest logiczne i spójne, co należy uznać za jeden z istotnych atutów rozprawy. Pominęto jednak efekt końcowy badań, czyli opracowanie procedury remediacji gleb *in situ* zamieszczonej w rozdziale 7.

Rozdział 4 „Materiały i metody” jest bardzo obszerny i zajmuje łącznie niemal 30 stron. W pierwszej części Autorka zamieściła charakterystykę terenu badań obejmującą poletka gleb zanieczyszczonych związkami ropopochodnymi (podrozdział 4.1.1) oraz metalami ciężkimi (podrozdział 4.1.2). Moim zdaniem, brakuje tutaj ogólnego opisu środowiska przyrodniczego, co również podkreśliłem w punkcie 3.5 recenzji.

W podrozdziale 4.2 zamieszczono opis metod badań terenowych przeprowadzonych na dwóch poletkach badawczych. W odniesieniu do lokalizacji miejsc poboru próbek oraz sposobu ich pobierania zastosowano procedury określone w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi (Dz.U. 2016, poz. 1395). Szkoda jednak, że lokalizacji miejsc poboru próbek nie przedstawiono na mapach.

W kolejnych ośmiu podrozdziałach przedstawiono: charakterystyki materiału roślinnego wykorzystanego w doświadczeniach (4.3), biopreparatu stosowanego do bioremediacji (4.4) oraz wykorzystanych dodatków fitostabilizujących (4.5), a także opisano doświadczenia polowe i wazonowe, w których zastosowano wybrane techniki bioremediacji (4.6), fitoremediacji (4.7-4.10), co łącznie obejmuje trzynaście stron manuskryptu. Nie mam większych zastrzeżeń do treści tych podrozdziałów. Dobór metod remediacji przez Doktorantkę wydaje się słuszny, co znajduje potwierdzenie w dalszych częściach pracy.

Zakres i metody badań laboratoryjnych, wykonanych w laboratoriach badawczych GBA POLSKA Sp. z o.o., opisano na jedenastu stronach manuskryptu (podrozdział 4.11). Generalnie opisy metod analitycznych są klarowne i zostały przygotowane starannie oraz poprawnie. Bardzo pozytywnie oceniam zestawienie zamieszczone w tabeli 4 (s. 59), zawierające zakresy pomiarowe zastosowanych metod badawczych, pozwalające na kontrolę wiarygodności uzyskanych wyników. Zwracam jednak uwagę na drobne przeoczenie na s. 52 (podrozdział 4.11.2), gdzie wymieniono odczynniki (np. HF, H₂O₂ i in.), które nie były używane do mineralizacji próbek. Tak to przynajmniej wynika z opisu znajdującego się na s. 54. Poza tym nie jest jasne, dlaczego Autorka zdecydowała się na umieszczenie w opisie metod dotyczących pomiaru odczynu (podrozdział 4.11.3) oraz wodoprzepuszczalności (podrozdział 4.1.15), gdyż wyniki tych pomiarów, ani nie zostały zestawione w pracy, ani też

nie były dyskutowane. Wzmianka o odczynie gleby pojedynczej próbki pojawia się jedynie w podrozdziale 4.10 (s. 49, drugi akapit), w którym opisywana jest metoda fitostabilizacji z użyciem dodatków doglebowych.

Metody statystyczne wykorzystano jedynie w minimalnym zakresie, co wynika z opisu przedstawionego w podrozdziale 4.12. Moim zdaniem, przy tak bogatym zestawie danych można było pokusić się na przykład o sprawdzenie istotności statystycznej różnic w stężeniach substancji ropopochodnych w próbkach gleby w czasie trwania doświadczenia wazonowego (tabele 11 i 12, s.74), co niewątpliwie wzmocniłoby interpretację uzyskanych wyników. Analogiczna uwaga odnosi się także do niektórych wykresów, np. rys. 24 (s.77) i rys. 25 (s.79), przedstawiających stopień redukcji zawartości metali ciężkich w glebach w procesie fitoremediacji.

Reasumując, przyjęty zakres badań oraz metody badawcze pozwoliły na zebranie bardzo wartościowych danych empirycznych, które należy uznać za wystarczające do właściwej realizacji założonego celu badań oraz prawidłowego wnioskowania.

3.2. Dobór źródeł piśmienniczych

Spis literatury jest bardzo bogaty i zawiera ponad 170 pozycji, co może świadczyć o dociekliwości naukowej Doktorantki. Należy podkreślić, że w spisie znajdują się zarówno artykuły krajowe, jak i zagraniczne, o szerokim zakresie tematycznym, w bardzo wielu przypadkach opublikowane w okresie ostatnich dwudziestu lat. Moim zdaniem, spis ten dobrze odzwierciedla wielowątkowe podejście zastosowane w niniejszej pracy i ma ścisły związek z realizowanymi zadaniami badawczymi.

Ponadto na uwagę zasługuje przegląd literatury, obejmujący 19 stron (Rozdział 2), który stanowi bardzo dobre wprowadzenie do przeprowadzonych badań. Obejmuje on zwięzłą charakterystykę zagadnień związanych z aktami prawnymi dotyczącymi stopnia zanieczyszczenia gleby, źródeł i skutków zanieczyszczenia środowiska substancjami ropopochodnymi i metalami ciężkimi oraz technologiami i metodami przeciwdziałania tym zanieczyszczeniom.

W rozdziale „Dyskusja wyników” Autorka umiejętnie cytuje liczne prace, porównując wyniki własne z danymi literaturowymi i konfrontując swoje spostrzeżenia i wnioski z poglądami innych autorów. Wszystkie wymienione powyżej fakty niewątpliwie potwierdzają bardzo dobrą znajomość literatury przedmiotu przez Doktorantkę.

3.3. Dokumentacja tabelaryczna i graficzna

Nie mam większych zastrzeżeń odnośnie do rysunków i zestawień tabelarycznych umieszczonych w pracy, które w większości przypadków zostały przygotowane starannie i są bardzo dobrym uzupełnieniem treści pracy. Wśród nielicznych drobnych niedociągnięć należy wymienić słabą jakość podkładów topograficznych oraz brak podania ich źródła na rys. 3 (s. 32) i rys. 4 (s. 33), a także słaba czytelność tabeli pod wykresem i elementów legendy na rys. 20 (s. 71). Ponadto rysunki 8-13 należałoby raczej nazwać fotografiami, ponieważ nie zostały one zmodyfikowane poprzez dodanie innych elementów graficznych.

3.4. Język i styl

Rozprawa została napisana językiem bardzo precyzyjnym, co wskazuje na właściwe opanowanie techniki pisania prac naukowych przez Autorkę. Dokonane przez nią spostrzeżenia i interpretacje są jasne, zrozumiałe i dlatego pracę czyta się dobrze. Niemniej jednak w tekście można znaleźć drobne błędy edytorskie, językowe i terminologiczne. Do najważniejszych z nich należą:

s. 29 – Autorka stosuje terminy „cel generalny” i „cel główny”. Proszę o wyjaśnienie czemu miało służyć takie rozróżnienie.

s. 38 – zamiast sformułowania „dość tolerancyjna na zasolenie ziemi” należałoby użyć „dość tolerancyjna na zasolenie gleby”.

s. 39 – „odczyn zawiesiny 7-10”, s.40 – „odczyn 9,1” są niewątpliwie skrótami myślowymi. Odczyn gleby może być kwaśny, obojętny lub zasadowy, a jego miarą jest pH. Należałoby więc napisać odpowiednio „pH zawiesiny 7-10” oraz „pH 9,1”.

s. 39 – poprawne sformułowanie powinno brzmieć „zawartość ziaren na sicie o średnicy 0,056 mm – max 20%”.

s. 92. – niekonsekwentne stosowanie jednostek SI. Wielokrotnie pojawia się „mg TPH/kg” zamiast „mg TPH·kg⁻¹”.

3.5. Ogólna ocena pracy i uwagi dyskusyjne

Pani mgr Marta Składowska podjęła interesujący, ważny i równocześnie ambitny temat badawczy. Należy stwierdzić, że jego realizacja w pełni spełnia wymagania doktoratu wdrożeniowego. Starannie zaplanowane i wykonane doświadczenia polowe i wazonowe służyły poprawie efektywności wybranych metod remediacji gleb zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi oraz metalami ciężkimi. Doktorantka przetestowała możliwości remediacyjne wybranych gatunków roślin, bakterii oraz naturalnych dodatków doglebowych

i udokumentowała skuteczność zastosowanych metod. W rezultacie opracowano autorską procedurę remediacji gleb *in situ*, opisaną w rozdziale 7 rozprawy, wykorzystującą wybrane techniki bioremediacyjne i fitoremediacyjne. Autorka zaproponowała zastosowanie rokitnika zwyczajnego jako roślinę przydatną do fitoremediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi, a do redukcji zanieczyszczeń substancjami ropopochodnymi rośliny wchodzące w skład tzw. łąk kwietnych, tj. różne gatunki traw, babkę lancetowatą, koniczynę białą i czerwoną. W razie konieczności, dla polepszenia właściwości gleb, sugerowane jest stosowanie dodatków doglebowych (bentonit na bazie montmorylonitu, wapno dolomitowe, mączka bazaltowa lub drobnoziarnista frakcja węgla brunatnego). Do usuwania skażeń substancjami ropopochodnymi Autorka wskazała także metodę bioremediacyjną opartą na aplikacji bioroztworu z bakteriami tlenowymi z rodzaju *Bacillus* Sp. Jak to podkreślono w pracy, metody remediacji *in situ* zostały wdrożone w firmie GBA Polska w ramach świadczonych przez nią usług.

W mojej opinii do największych zalet niniejszej rozprawy należą:

- Podjęcie zagadnienia o dużym znaczeniu zarówno w aspekcie teoretycznym, jak i praktycznym.
- Zastosowanie kompleksowego podejścia badawczego opartego na doświadczeniach polowych i wazonowych oraz właściwy dobór metod analitycznych służących rozwiązaniu problemu badawczego.
- Krytyczne podejście do zastosowanych metod remediacji, ich wnikliwa dyskusja oraz końcowa selekcja w odniesieniu do wyników własnych oraz literatury przedmiotu.
- Opracowanie stosunkowo łatwej do zastosowania oraz relatywnie taniej procedury remediacji *in situ* gleb zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi oraz metalami ciężkimi.
- Uzupelnienie stanu wiedzy na temat gleb przekształconych antropogenicznie i technogenicznie.
- Klarowna i logiczna struktura pracy.

Jednakże w czasie lektury dysertacji Pani mgr Marty Składowskiej nasunęło mi się kilka uwag dyskusyjnych i pytań, które można by rozważyć, planując publikację uzyskanych wyników:

- Autorka zgodnie z założeniami badawczymi przyjętymi w rozprawie potraktowała glebę głównie jako substrat służący do przeprowadzenia eksperymentów badawczych, nieco oderwany od środowiska przyrodniczego. Dla mnie jako gleboznawcy takie podejście jest

w pewnym stopniu niewystarczające z powodu braku informacji dotyczących np. regionalizacji fizyczno-geograficznej, ukształtowania terenu (w tym szczególnie przekształceń antropogenicznych), warunków geologicznych i wodnych, szaty roślinnej, a także typologii gleb w obrębie poletek badawczych. Takie informacje mogłyby znaleźć się w podrozdziale 4.1.

- W moim odczuciu należałoby bardziej wyeksponować aspekt przestrzenny przeprowadzonych badań, co jest typowe dla dyscypliny nauki o Ziemi i środowisku. Mogłoby temu służyć na przykład wykreślenie szczegółowych map dla poszczególnych poletek badawczych: lokalizacyjnych, czyli z rozmieszczeniem punktów poboru próbek oraz prezentujących analizowane punktowo właściwości gleb przed i po przeprowadzeniu remediacji.
- Moim zdaniem, należałoby więcej uwagi poświęcić podstawowym właściwościom gleb, z których bardzo lakonicznie omówiono jedynie uziarnienie (podrozdział 5.1). Brak jest natomiast wyników analizy odczynu gleby (mimo opisu metody oznaczania pH w podrozdziale 4.11.3) oraz współczynnika filtracji wód i gruntów (podrozdział 4.11.5). Warto zwrócić uwagę, że wymienione parametry gleb oraz także nieoznaczona w badaniach zawartość materii organicznej należą do głównych czynników warunkujących akumulację, mobilność oraz biodostępność analizowanych pierwiastków śladowych. Parametry te mogą być także istotne w remediacji gleb zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi.
- Czy badane gleby były węglanowe czy bezwęglanowe?
- Czy badano wielkość transferu szkodliwych metali z gleb do części podziemnej i nadziemnej roślin? Jak zdaniem Doktorantki, należałoby racjonalnie gospodarować biomasą roślin wykorzystanych do fitoremediacji (fitoekstrakcji)?

Reasumując, stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr Marty Składowskiej pt. „Metody remediacji *in situ* z wykorzystaniem naturalnych właściwości skał oraz organizmów żywych” stanowi udaną próbę oryginalnego i kompleksowego rozwiązania problemu naukowego i tym samym wnosi istotny wkład do stanu wiedzy na temat degradacji i remediacji gleb, w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku. Wykorzystanie szerokiego zakresu danych oraz ich rzetelna wielowątkowa analiza osadzona w dobrej znajomości literatury świadczą niewątpliwie o bardzo dobrym opanowaniu ogólnej wiedzy

teoretycznej przez Doktorantkę oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wysoko oceniam opracowanie przez Autorkę kilkuwariantowej procedury remediacji gleb zanieczyszczonych węglowodorami ropopochodnymi oraz metalami ciężkimi, poprzedzone krytyczną weryfikacją skuteczności wybranych metod w warunkach eksperymentu polowego i wazonowego, co niewątpliwie potwierdza właściwą realizację doktoratu wdrożeniowego.

Przedstawione w mojej recenzji uwagi krytyczne i dyskusyjne mają głównie charakter uzupełnień i poprawek redakcyjnych oraz nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę niniejszej dysertacji.

4. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę powyższe, należy stwierdzić, że recenzowana praca spełnia ustawowe kryteria stawiane rozprawom doktorskim, określone w *art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U z 2018 r., poz. 1668 ze zm.)* i może stanowić podstawę jej obrony publicznej. **W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pani mgr Marty Składowskiej do dalszych etapów w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku.**



prof. dr hab. Piotr Hulisz