

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Jakubowskiego pt. „Wpływ pyłu kamiennego na ograniczenie fitoprzyswajalności miedzi, niklu i cynku z gleb zanieczyszczonych tymi pierwiastkami”.

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Ewa Stanisławska-Głubiak, prof. nadzw.

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Bernard Gałka

Recenzję przygotowano na zlecenie Z-cy przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Puławach, Pana prof. dr hab. Adama Harasima, zgodnie z pismem L. dz. RN-4/2019.

Ogólna charakterystyka

Rozprawa doktorska mgr inż. Marka Jakubowskiego pt. „Wpływ pyłu kamiennego na ograniczenie fitoprzyswajalności miedzi, niklu i cynku z gleb zanieczyszczonych tymi pierwiastkami” została wykonana w Zakładzie Herbologii i Technik Uprawy Roli we Wrocławiu IUNG-PIB. Rozprawa została wydana w formie zwartej i oprawionej maszynopisu: 87 stron, w tym 33 zbiorcze tabele, 5 rysunków. Praca została podzielona na 8 rozdziałów: wstęp; przegląd literatury; metody badań; wyniki; podsumowanie i dyskusja; wnioski i streszczenie (w języku polskim i angielskim). W rozdziale bibliografia Doktorant zamieścił 148 pozycji literatury w języku polskim i angielskim, w tym 73 pozycje w języku angielskim, 7 aktów prawnych. W obrębie rozdziałów wydzielono w większości podrozdziały, co ułatwiło studiowanie pracy. Zasadniczo układ pracy można uznać za typowy dla rozpraw doktorskich.

Tematyka rozprawy doktorskiej

Spośród wielu form degradacji gleb do szczególnie niebezpiecznych należy degradacja chemiczna, spowodowana wprowadzaniem do niej obcych substancji chemicznych pochodzenia organicznego (substancje ropopochodne, WWA, chloroorganiczne, dioksyny, PCB, pestycydy należące do różnych grup chemicznych) oraz substancji pochodzenia nieorganicznego, zawierających metale ciężkie (opad pyłów metalurgicznych, ścieki, odpady, niektóre nawozy mineralne i organiczne oraz pestycydy). Metale ciężkie trwają w środowisku, ulegając przemieszczaniu i wchodzą w skład różnych związków. Stąd gleby produktywne lecz zanieczyszczone metalami ciężkimi, stanowią zagrożenie dla całego łańcucha troficznego i wymagają podjęcia działań przywracających im właściwości niezbędne do pełnienia ich funkcji w środowisku. Aktualnie podejmowane są działania dotyczące nie tyle całkowitego usunięcia metali ciężkich z gleb lecz ograniczenia ryzyka jakie stwarzają dla środowiska przyrodniczego. Dlatego zminimalizowanie negatywnych skutków oddziaływania metali ciężkich na środowisko, próbuje się osiągnąć poprzez ich immobilizację w glebie w wyniku modyfikacji właściwości zanieczyszczonej gleby, a głównie odczynu i właściwości sorpcyjnych, jak również przez uprawę niektórych gatunków roślin zdolnych do adsorpcji metali i ich wytrącania w formie osadów. Wiąże się to z wprowadzeniem do gleby substancji o dużej pojemności sorpcyjnej np. materiałów organicznych (torf, węgiel brunatny), a także dodatków mineralnych. Użycie w celach remediacyjnych materiałów mineralnych, bogatych w glinokrzemiany i

minerały ilaste, a także zeolitów jako sorbentów zanieczyszczeń, może ograniczyć fitoprzyswajalność metali ciężkich występujących w glebie. Obróbka mechaniczna surowców skalnych dostarcza jako produktów ubocznych mączek skalnych i rozdrobnionych pyłów, co stwarza problem z ich składowaniem i zagospodarowaniem. Wykorzystanie takich odpadów do procesu remediacji gleb zanieczyszczonych metalami, wpisuje się w model gospodarki zamkniętej.

W tym aspekcie temat podjęty przez Doktoranta jest trafnie dobrany, gdyż łączy się z zastosowaniem odpadowego pyłu kamiennego do remediacji gleb zanieczyszczonych miedzią, niklem i cynkiem, na której uprawiano mozę trzcinową.

Wartość naukowa pracy

Rozprawę doktorską rozpoczęto krótkim wprowadzeniem w problematykę badawczą, zamieszczonym w rozdziale **Wstęp** (2 str.). Doktorant omówił potrzebę badań w zakresie problematyki remediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi, w tym miedzią, niklem i cynkiem, z zastosowaniem odpadu pyłu skalnego (kamiennego), a to wpisuje się również w zagospodarowanie odpadów powstających w środowisku w wyniku działalności gospodarczej człowieka. **Cel badań** został zamieszczony na końcu rozdziału wstępu. Doktorant postawił tezę, że pył skalny (kamienny) posiada właściwości remediacyjne, które pozwalają na jego wykorzystanie w celu unieruchomienia miedzi, niklu i cynku w glebach zanieczyszczonych tymi metalami, a tym samym ograniczenie fitoprzyswajalności i fitotoksyczności. Następnie określił cel badań, którym było sprawdzenie reakcji rośliny – moży trzcinowej, na zanieczyszczenie gleby miedzią, niklem i cynkiem oraz na zastosowany dodatek odpadowego pyłu skalnego do gleby, a także na zbadanie jego wpływu na zmianę właściwości fizykochemicznych gleby.

W rozdziale **Przegląd literatury**, który liczy 25 stron i został podzielony na 6 podrozdziałów, Doktorant zaprezentował dotychczasowe osiągnięcia na temat: pochodzenia i występowania metali ciężkich w środowisku glebowym; cynku, miedzi i niklu jako mikroelementów i pierwiastków o działaniu toksycznym; czynników wpływających na mobilność metali ciężkich w glebach; stanu zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi w Polsce; remediacji gleb skażonych metalami ciężkimi – aspekty prawne i wymogi; metod remediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi. Doktorant w sposób wyczerpujący omówił metale ciężkie, uwzględniając ich pochodzenie w aspekcie źródeł naturalnych i antropogenicznych. Zwrócił uwagę na ich migrację i obieg w środowisku stwierdzając, że zanieczyszczenie metalami ciężkimi jest jednak związane przede wszystkim z działalnością człowieka.

W dalszej części Doktorant omówił jak eksploatacja kopalni, w tym rud metali i ich przetwarzanie, prowadzi do zanieczyszczenia środowiska naturalnego, a szczególnie obszarów wydobywania i terenów bezpośrednio przyległych. Jako przyczynę zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi pochodzenia antropogenicznego, wskazał na różne rodzaje przemysłu i intensyfikację rolnictwa, w tym na aplikację do gleby różnych materiałów odpadowych, a także transport samochodowy. Wyróżnił wśród metali ciężkich niezbędne dla roślin mikroelementy, jak również metale dla nich zbędne o działaniu toksycznym. Podkreślił rolę mikroelementów w efektywnym wykorzystaniu makroelementów w tworzeniu biomasy, a także jako aktywatorów wielu enzymów i ich uczestnictwo w procesach metabolicznych i fizjologicznych. Wspomniał również o zagrożeniach dla człowieka i środowiska, jakie może spowodować zanieczyszczenie gleb tymi pierwiastkami, ich migrację w głąb profilu glebowego, do wód podziemnych i powierzchniowych oraz do łańcucha troficznego. Wskazał na degradację gleb spowodowaną ich nadmiarem i utratą podstawowych funkcji gleb w wyniku zakłócenia równowagi jonowej oraz na negatywny wpływ na rozwój i działalność mikroorganizmów glebowych, ich liczebność i różnorodność gatunkową. Następnie Doktorant omówił formy

metali występujących w glebie oraz ich przemiany związane z adsorpcją na powierzchni składników mineralnych i wiązaniem z substancjami próchnicznymi, co z kolei prowadzi do ich przejścia w formy niedostępne dla organizmów żywych. Mogą one występować także w formie wolnych jonów łatwo pobieranych przez system korzeniowy roślin. Doktorant omówił również ich toksyczne oddziaływanie na większość roślin, które się ujawnia przy wysokim poziomie zanieczyszczenia gleb tymi pierwiastkami. Metale te, występując w ilościach toksycznych w komórce, wpływają na procesy fotosyntezy, oddychania i transpirację. Mogą także przyczyniać się do powstawania reaktywnych form tlenu i wolnych rodników, co prowadzi do stresu fizjologicznego, który stwarza niebezpieczeństwo dla prawidłowego funkcjonowania komórek. Podkreślił jak ważne jest wytworzenie mechanizmów adaptacyjnych u wielu gatunków roślin, pozwalających im na prawidłowe funkcjonowanie w warunkach wysokiej zawartości metali ciężkich w podłożu. Zwrócił też uwagę na mechanizmy zabezpieczające rośliny przez dostaniem się metali do cytoplazmy, co umożliwia roślinom ograniczenie ich pobierania przez korzenie na skutek wydzielania do gleby m. in. śluzów, histydyny, kwasów organicznych, które je unieruchamiają.

Doktorant wskazał również inne mechanizmy ochronne, polegające na gromadzeniu metali ciężkich w przestworach międzykomórkowych, modyfikacji struktury ściany komórkowej akumulującej toksyczne jony oraz ograniczenie transportu przez błony komórkowe. Podkreślił, że są także gatunki roślin, które wykształciły strategie obronne, polegające na neutralizacji jonów metali, dostających się w ilościach toksycznych do cytoplazmy. Rośliny te mają zdolność do syntezy różnych związków (metalotioneiny, fitochelatyny, kwasy organiczne i nieorganiczne i inne), w wyniku pojawienia się toksycznych pierwiastków w komórce, z którymi wiążą się, a to umożliwia im zachowanie funkcji metabolicznych.

Następnie Doktorant omówił szczegółowo cynk, miedź i nikiel i ich funkcje jako mikroelementów i pierwiastków o działaniu toksycznym. Podkreślił, że wspólną ich cechą jest toksyczne działanie, po przekroczeniu dopuszczalnego poziomu w tkankach organizmów żywych. Pierwiastki te jako mikroelementy w większych stężeniach mogą negatywnie wpływać na rośliny i inne organizmy. Stwierdził, że miedź i nikiel są pierwiastkami mało mobilnymi, a cynk – mobilnym w środowisku glebowym. Omówił także formy występowania tych pierwiastków w glebach, funkcje fizjologiczne i poziomy zawartości oraz reakcję roślin na ich niedobór i nadmiar. Przytoczył także dane literaturowe na temat szkodliwości ich wysokich koncentracji dla organizmu człowieka.

W kolejnym podrozdziale, dotyczącym czynników wpływających na mobilność metali ciężkich w glebach, zwrócił uwagę na ryzyko przedostania się tych metali do poszczególnych elementów środowiska, przy ich wysokim poziomie w glebie, szczególnie rozpuszczalnych form. Przechodzenie tych metali z formy stałej do roztworu stanowi istotne zagrożenie dla wód podziemnych i powierzchniowych. Rozpuszczalność metali ciężkich w glebie jest uwarunkowana rodzajem metali, pochodzeniem i właściwościami fizykochemicznymi gleby. Dużo większą rozpuszczalność wykazują metale pochodzenia antropogenicznego (wobec metali pochodzenia naturalnego w glebach), stąd potencjalne zagrożenie dla środowiska zanieczyszczenia nimi jest dużo większe. Stwierdził, że zachowanie się metali ciężkich w glebie, zależy od właściwości fizykochemicznych jak: pojemność sorpcyjna, pH, potencjał redoks i zawartość materii organicznej. Doktorant zaliczył pojemność sorpcyjną jako decydujący czynnik w unieruchamianiu metali ciężkich w fazie stałej, czyli ograniczeniu ich mobilności i dostępności dla roślin. W miarę zwiększenia się zawartości koloidów, zwiększa się zdolność immobilizacji metali w glebie. Odczyn gleby decyduje również o rozpuszczalności metali ciężkich w glebach, szczególnie w kwaśnym i lekko kwaśnym odczynie następuje desorpcja metali z fazy stałej do roztworu glebowego, a tym samym zwiększenie fitodostępnych form metali ciężkich z równoczesnym zwiększeniem ich zawartości w

roślinach. W warunkach obojętnego i zasadowego odczynu gleby, zachodzą procesy wiązania jonów metali w fazie stałej, stąd wapnowanie powoduje ograniczenie ich pobierania przez rośliny. Potencjał redoks, a szczególnie pojawienie się warunków beztlenowych, przy większej wilgotności, powoduje przewagę procesów redukcyjnych nad utlenianiem, a to sprzyja uruchamianiu metali ciężkich zaadsorbowanych i okładowanych na tlenkach Mn i Fe. Rozpuszczalność metali ciężkich zależy także od zawartości i rodzaju związków próchnicznych w glebach, które tworzą z metalami związki kompleksowe typu ligandów i chelatów, a potencjał ich wiązania jest tym większy im wartości pH są większe. Związki próchniczne wielkocząsteczkowe wykazują silne zdolności sorpcyjne w stosunku do metali, zwłaszcza miedzi, a niskocząsteczkowe – zwiększają ilość dostępnych form metali.

W dalszej części Doktorant omówił pobieranie metali ciężkich z gleby przez rośliny w kontekście interakcji synergistycznych i antagonistycznych pomiędzy nimi. Stwierdził również, że wysokie zawartości metali ciężkich w glebie mogą ograniczać pobieranie mikroelementów i makroelementów oraz przemieszczanie się, ważnych ze względu na metabolizm jonów z korzeni do pędów.

Doktorant omówił również stan zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi w Polsce na tle innych krajów europejskich, prezentując dane z Europejskiej Agencji Środowiska (EEA). Przytoczył także szczegółowo badania monitoringowe IUNG-PIB, związane z ich obecnością w glebach użytkowanych rolniczo.

W dalszej kolejności Doktorant omówił strategię remediacji gleb skażonych metalami ciężkimi w kontekście aspektów prawnych i wymogów. Przytoczył Rezolucję Parlamentu Europejskiego w sprawie Strategii Tematycznej w dziedzinie ochrony gleb (COM 2006), w której wskazano na potrzebę ochrony gleb przed istotnymi zagrożeniami, do których zalicza się m.in. zanieczyszczenie różnego rodzaju substancjami chemicznymi. W tej rezolucji zwraca się uwagę na podstawowe funkcje gleb wykorzystywanych rolniczo: produkcyjną, siedliskową i retencyjną. Jednym z najważniejszych zagrożeń dla siedliskowych i produkcyjnych funkcji gleb użytkowych rolniczo, jest zanieczyszczenie szkodliwymi substancjami, w tym metalami ciężkimi. W dalszej części tego podrozdziału omówił akty prawne obowiązujące w Polsce, poczynając od Ustawy o Ochronie Gruntów Rolnych i Leśnych (1995), poprzez Prawo Ochrony Środowiska (POŚ – 2001), Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie standardów jakości ziemi (2016 r.). W związku z koniecznością wdrożenia dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (2010/75/UE) z dnia 10 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych, Ustawa POŚ (2001) została znowelizowana (POŚ – 2014). Pojęcie rekultywacji gleby w stosunku do zanieczyszczeń chemicznych zostało zastąpione terminem „remediacja”, któremu nadano konkretne brzmienie oznaczające „poddanie gleby, ziemi i wód gruntowych działaniom mającym na celu usunięcie lub zmniejszenie ilości substancji powodujących ryzyko, ich kontrolowanie oraz ograniczenie rozprzestrzeniania się, tak aby teren zanieczyszczony przestał stwarzać zagrożenie dla zdrowia ludzi lub stanu środowiska z uwzględnieniem obecnego i, o ile jest to możliwe, planowanego w przyszłości sposobu użytkowania terenu”. Doktorant omówił zmiany w ustawie POŚ (2014), Rozporządzeniu Ministra Środowiska (2016) i zakres dopuszczalnych limitów zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi dla 4 kategorii gruntów. Wskazał również, że na świecie stosuje się ocenę ryzyka ekologicznego (ERA) lub ryzyka zdrowotnego (HRA), jakie mogą powodować poszczególne substancje niebezpieczne w określonych warunkach środowiskowych. W podrozdziale metody remediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi wskazuje, że remediacja gleb skażonych metalami ciężkimi może odbywać się w oparciu o uruchomienie i usunięcie z gleby nadmiaru metali, bądź też ich immobilizację w glebie, która ma na celu ograniczenie ich biodostępności i rozprzestrzeniania się na inne tereny.

W dalszej części Doktorat omówił mechanizm remediacji z uruchomieniem i usunięciem metali ciężkich z gleby podkreślając, że jest to związane z wysokimi kosztami i

wieloma skutkami ubocznymi. Wskazał tu na znacznie tańszą i przyjazną środowisku metodę usuwania metali ciężkich, jako jedną z technik fitoremediacyjnych, o nazwie fitoekstrakcja, którą szczegółowo opisał, wyróżniając także indukowaną fitoekstrakcję.

Doktorant szczegółowo scharakteryzował metody remediacji gleb zanieczyszczonych przez toksyczne pierwiastki poprzez ich unieruchomienie w glebie – immobilizację. Podkreślił, że efekty immobilizacji zanieczyszczeń można osiągnąć przez modyfikację niektórych właściwości gleby ograniczających rozpuszczalność metali ciężkich. Wskazał na modyfikację odczynu poprzez wapnowanie i poprawę zdolności sorpcyjnych przez stosowanie różnych dodatków doglebowych np. związki fosforu, glinokrzemiany czy materiały organiczne, które mogą unieruchamiać te metale. Zwrócił przy tym uwagę, że zabiegi te zmniejszają ryzyko ekologiczne, związane z obecnością metali ciężkich ponad dopuszczalne normy, lecz nie eliminują całkowicie zagrożenia. Zwrócił uwagę na hałdy górnicze i składowiska odpadów przemysłowych, które stabilizuje się przez dobór roślin mogących rozwijać się w skrajnie trudnych warunkach i naturalnie występujących na tym terenie, a które są zdolne do akumulacji metali ciężkich w korzeniach, przy ograniczonej ich translokacji do części nadziemnych. Wymienił tu trawy (kostrzewa czerwona, mietlica pospolita, spartina gęstokwiatowa), niektóre gatunki drzew i roślin uprawnych. Zaliczył tu wierzbę energetyczną, kukurydzę, miskanta olbrzymiego jako przydatnych do fitostabilizacji gleby zanieczyszczonej niektórymi metalami. Inną metodą immobilizacji metali ciężkich w glebie jest zastosowanie związków fosforu (chemisorpcja), które mają zdolności do sorbowania i strącania w postaci stabilnych form stałych z jonami metali ciężkich. Immobilizacja indukowana fosforanami jest uznawana za skuteczną metodę remediacji *in situ* dla gleb zanieczyszczonych metalami, gdyż fosforany adsorbujące i chelatujące metale ciężkie wykazują mniejszą rozpuszczalność w glebie i większą stabilność od innych anionów.

Doktorant zwrócił uwagę na rolę w glebie związków próchnicznych w kształtowaniu właściwości gleb, a także ich dużych zdolności sorpcyjnych, wpływających na ograniczenie fitoprzyswajalnych form metali ciężkich. Ochronna rola substancji organicznych w glebie wiąże się z wysoką zdolnością do wymiany kationów i tworzenia chelatów z jonami metali ciężkich. Wskazał także na minerały ilaste, które ze względu na swoje właściwości sorpcyjne, mogą ograniczać biodostępność metali ciężkich w glebie. Dlatego aplikacja do gleby minerałów ilastych jest skuteczną metodą ograniczenia biodostępności metali ciężkich. Dodatek naturalnego zeolitu, czy syntetycznych zeolitów do gleby może wpłynąć na immobilizację Pb, Cd i Zn i ograniczenie pobierania przez rośliny. Montmorylonit wpływał na unieruchomienie Ni, Cd, Zn i Pb, a bentonity – Cd, Ni, Zn i Cu. Dodatek pyłu bazaltowego do gleby poprawił jej właściwości m.in. redukując zakwaszenie gleby (pH, Hw), zwiększał zawartość wymiennych kationów zasadowych (Ca, Mg, K). Ponadto zagospodarowanie materiału odpadowego z obróbki bazaltu i innych kruszców może ograniczyć problemy ze składowaniem.

Rozdział ten jest napisany poprawnie i wyczerpująco, nie mam zastrzeżeń pod względem merytorycznym i redakcyjnym. Doktorant wykazał się dobrym rozeznaniem w literaturze problemu i wykorzystał w nim 135 pozycji.

Rozdział **Metodyka Badań**, liczy 4 strony i został podzielony na 2 podrozdziały: Badania fizykochemiczne pyłu kamiennego; Doświadczenia mikropoletkowe; w obrębie którego są wyodrębnione analizy chemiczne i obliczenia wskaźników tolerancji i bioakumulacji. W podrozdziale: Badania fizykochemiczne pyłu kamiennego, Doktorant opisał pochodzenie odpadowego pyłu kamiennego z terenu hurtowni materiałów kamieniarskich w Piławie Górnej k/ Dzierżoniowa na Dolnym Śląsku. Próbkę tego pyłu pobrano z 5-ciu głębokości po czym zmieszano je, tworząc próbkę średnią. Pył ten został scharakteryzowany pod względem właściwości fizykochemicznych tj. składu mineralogicznego; suchej masy; zawartości P_2O_5 , K_2O , CaO i MgO ; zawartości Cr, Zn, Cd, Cu, Ni, Pb i Hg. W badaniach tych

zastosowano prawidłowe metody i procedury analityczne z użyciem specjalistycznej i nowoczesnej aparatury. Dodatkowo wykonano również oznaczenia gęstości objętościowej, gęstości właściwej, powierzchni właściwej, przebiegu krzywej desorpcji wody w glebie.

Glebę pobrano z mikropoletek (z każdego powtórzenia) obiektu kontrolnego, uśredniono i zmieszano z pyłem kamiennym w proporcjach, od 100% gleby + 0% pyłu kamiennego, aż do 0% gleby i 100% pyłu kamiennego (6 obiektów).

W podrozdziale doświadczenie mikropoletkowe opisał prowadzenie badań polowych (2011-2012) w Stacji Doświadczalnej IUNG-PIB w Baborówku k/Poznania. Wykorzystano obetonowane mikropoletki wypełnione glebą kwaśną, o składzie granulometrycznym piasku gliniastego, niskiej zawartości Corg., a gleba była symulacyjnie skażona miedzią, niklem i cynkiem (każdym metalem oddzielnie). Przedplonem były spartina i miskantus. Następnie na części mikropoletek ze skażoną glebą, w celu jej remediacji, rozsypano równomiernie pył kamienny. Doświadczenie założono w układzie dwuczynnikowym, kompletnie zrandomizowanym w 4 powtórzeniach. Pierwszym czynnikiem zmiennym był rodzaj i poziom zanieczyszczenia: kontrola; Cu 1, Cu 2, Cu 3; Ni 1, Ni 2, Ni 3; Zn 1, Zn 2, Zn 3. Drugim czynnikiem zmiennym był poziom remediacji gleby: kontrola; pył kamienny (w dawce $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$). Gleba ta była zanieczyszczona miedzią w stopniu silnym (Cu 1) i bardzo silnym (Cu 2, Cu 3), niklem – średnim (Ni 1) i silnym (Ni 2 i Ni 3), a cynkiem w stopniu średnim (Zn 1 – Zn 3).

Rośliną testową była mozga trzcinowata uprawiana przez dwa lata. Zgodnie z zaleceniami dla traw zastosowano dawki NPK odpowiednio: 60, 100, 50 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ i dodatkowo 60 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ po I pokosie. W obu latach zebrano po 2 pokosy zielonej masy. Określono plon zielonej i powietrznie suchej masy części nadziemnej. Po II pokosie trawy (w 2012 r.) pobrano korzenie. Przed założeniem doświadczenia i po zakończeniu każdego okresu wegetacji pobrano próbki glebowe do analiz. W próbkach roślinnych oznaczono zawartość Cu, Ni i Zn metodą spektrofotometrii absorpcji atomowej (F-AAS), skład granulometryczny gleby oznaczono metodą areometryczno-sitową, pH metodą potencjometryczną w roztworze KCL o stężeniu $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, a Corg metodą Tiurina. Obliczono także wskaźniki tolerancji – indeks tolerancji mozgi na poszczególne metale (Ti) i współczynniki bioakumulacji BAF_n (dla części nadziemnych roślin) i BAF_k (dla korzeni roślin) oraz współczynnik translokacji metali w roślinie (TF). Wyniki i wielkość plonów opracowano przy pomocy analizy wariancji w programie AWAR, opracowanym w IUNG-PIB Puławy. Różnice pomiędzy obiektami oceniono testem Tukeya przy poziomie istotności $P < 0,05$.

Rozdział został napisany poprawnie, w sposób przejrzysty opisano metody badań. Doktorant, jednak pominął informacje o metodach oznaczania makroelementów w roślinach.

Rozdział **Wyniki**, liczący 33 strony, został podzielony na 4 podrozdziały I-rzędu, a w ich obrębie wydzielono 12 podrozdziałów II-rzędu. Są to następujące podrozdziały I-rzędu: „Właściwości fizykochemiczne pyłu kamiennego”, „Efekty remediacyjne pyłu stosowanego na glebie zanieczyszczonej miedzią”, „Efekty remediacyjne pyłu stosowanego na glebie zanieczyszczonej niklem”, „Efekty remediacyjne pyłu stosowanego na glebie zanieczyszczonej cynkiem”. W ich obrębie występują po cztery podrozdziały II-rzędu „Właściwości chemiczne gleby”, „Plon roślin”, „Zawartość i bioakumulacja miedzi w roślinie”, „Zawartość makroelementów w roślinie”. Analogicznie po cztery podrozdziały II-rzędu występują w kolejnych podrozdziałach I-rzędu, tylko z innymi badanymi metalami.

Doktorant w tych podrozdziałach dokonał oceny właściwości pyłu kamiennego i efektów remediacyjnych zastosowanego pyłu na glebach w różnym stopniu zanieczyszczonych miedzią, niklem i cynkiem, uwzględniając przy tym właściwości chemiczne gleby, plon mozgi trzcinowatej uprawianej w tych warunkach zanieczyszczenia poszczególnymi metalami oraz zawartość i bioakumulację poszczególnych metali (Cu, Ni i Zn) w roślinie, a także kształtowanie się makroelementów w roślinie.

Doktorant szczegółowo scharakteryzował pył kamienny, który został wykorzystany do remediacji gleby zanieczyszczonej metalami. Stwierdził w nim obecność następujących minerałów: mik, amfiboli, skaleni, piroksenów oraz kwarcu, a także niewielkich ilości kalcytu i dolomitu. Minerale ilaste występujące w nim były reprezentowane przez kaolinit i minerale mieszano-pakietowe z grupy illitu – smektytu. Pył ten zawiera substancję amorficzną, na ogół o dużej powierzchni właściwej. Pył miał odczyn zasadowy i wykazał się obecnością w nim rozpuszczalnych makroskładników, głównie wapnia, potasu, a także fosforu. Zawartości pierwiastków śladowych nie przekraczały w nim wartości dopuszczalnych, zgodnie z prawem, stąd można go było użyć do celów remediacyjnych. Po zastosowaniu odpadowego pyłu do gleby, zmieniały się właściwości fizyczne gleby (gęstość właściwa, gęstość objętościowa, porowatość, powierzchnia właściwa), zależnie od proporcji między pyłem a glebą. Stwierdził również poprawę właściwości wodnych m. in. wody dostępnej dla roślin, połowej pojemności wodnej w mieszaninach glebowych z dużym udziałem pyłu kamiennego.

Doktorant wykazał zróżnicowanie właściwości chemicznych gleby w zależności od poziomu zanieczyszczenia miedzią, niklem i cynkiem oraz zaaplikowanej dawki pyłu kamiennego. Zawartość miedzi, niklu i cynku znacząco się zwiększyła w glebie przy jej największym zanieczyszczeniu tymi pierwiastkami. Nastąpiło przy tym stopniowe obniżenie wartości pH gleby, zwiększenie kwasowości hydrolitycznej, obniżenie sumy kationów zasadowych, a szczególnie wapnia wymiennego i pojemności sorpcyjnej gleby. Zastosowanie remediacji gleby z użyciem pyłu skalnego nie wpłynęło na zawartość Cu, ani znacząco na zawartość Ni w glebie, a obniżyło zawartość Zn, szczególnie na obiektach zanieczyszczonych tymi pierwiastkami w porównaniu do obiektów bez remediacji pyłem. Aplikacja pyłu do gleby spowodowała także obniżenie wartości pH i sumy kationów zasadowych (S), w tym Ca – wymiennego i pojemności sorpcyjnej, a zwiększenie kwasowości hydrolitycznej gleby.

Plony mozgi trzcinowatej zbierano w dwóch pokosach w obu sezonach wegetacyjnych (2011 i 2012). Nie stwierdzono negatywnego wpływu zanieczyszczenia gleby miedzią w stopniu silnym na plon mozgi, a przy zanieczyszczeniu gleby w stopniu bardzo silnym rośliny nie wykiełkowały. Okazało się, że bardzo silne zanieczyszczenie gleby miedzią, było fitotoksyczne dla mozgi i wpłynęło na zahamowanie wschodów roślin. Zanieczyszczenie gleby cynkiem na poziomie średnim wpłynęło na obniżenie plonu biomasy mozgi w porównaniu do gleby o naturalnej zawartości cynku, szczególnie w pierwszym roku prowadzenia doświadczenia.

Doktorant w przeprowadzonych badaniach stwierdził, że remediacyjne oddziaływanie pyłu skalnego na plon mozgi było zróżnicowane w zależności od stopnia zanieczyszczenia gleby Cu, Ni i Zn, a także sezonu wegetacji i pokosu zbieranej biomasy. Aplikacja pyłu skalnego do gleby zanieczyszczonej miedzią stopniu silnym i gleby o naturalnej zawartości, spowodowała obniżenie plonów. Remediacyjne działanie pyłu skalnego ujawniło się na glebie zanieczyszczonej w stopniu bardzo silnym, na której bez dodatku pyłu rośliny nie wykiełkowały. Zastosowanie pyłu skalnego przy bardzo silnym zanieczyszczeniu miedzią, spowodowało efekt remediacyjny w formie produkcji biomasy części nadziemnej w obu sezonach wegetacyjnych i biomasy korzeni 2012 roku. Stwierdzono lepszą tolerancję (Ti) mozgi uprawianej w drugim roku badań, na glebie w silnym stopniu zanieczyszczonej miedzią w odniesieniu do gleby obiektu z naturalną jej zawartością.

Doktorant stwierdził, że mozga uprawiana na glebie silnie zanieczyszczonej niklem nie wykiełkowała w badanych latach. W drugim sezonie wegetacyjnym plony mozgi w II pokosie były dwukrotnie niższe niż w - pierwszym i brak było różnic między wielkością biomasy zebranej z gleby o naturalnej zawartości niklu, a średnio i silnie zanieczyszczonej. Aplikacja pyłu kamiennego do gleby wpłynęła na obniżenie plonów mozgi w pierwszym sezonie wegetacyjnym w porównaniu z analogicznymi obiektami – bez pyłu. Z kolei w drugim roku

badania, dodatek pyłu skalnego do gleby, spowodował odmienne efekty w poszczególnych pokosach. Masa korzeni po zakończonej wegetacji, była istotnie większa na obiekcie z glebą o średnim zanieczyszczeniu niklem od tej zebranej z gleby o naturalnej zawartości. Aplikacja pyłu spowodowała istotne obniżenie masy korzeni na glebie z naturalną zawartością oraz o średnim i silnym zanieczyszczeniu niklem. Porównanie plonów uzyskanych na glebie zanieczyszczonej Ni z plonami z analogicznych obiektów poddanych remediacji pyłem skalnym, wskazuje na korzystniejsze działanie tego zabiegu na przyrost masy części nadziemnej mozgi niż masy jej korzeni. Na podstawie indeksów tolerancji (Ti) Doktorant stwierdził, że mozga tolerowała lepiej nadmiar niklu w drugim roku badań niż – w pierwszym.

Na wszystkich obiektach gleby, która była średnio zanieczyszczona cynkiem, zebrano również po 2 pokosy mozgi trzcinowatej w każdym roku badań. W I pokosie sezonu wegetacyjnego (2011 r.) stwierdzono ponad dwukrotne obniżenie plonu mozgi, na glebie o największym zanieczyszczeniu Zn. Podobnie w II pokosie, następowała stopniowa redukcja wielkości plonu w miarę wzrostu zanieczyszczenia gleby cynkiem w odniesieniu do gleby z naturalną jego zawartością. W drugim roku badań sumaryczne plony mozgi były większe niż w poprzednim roku. Zastosowanie pyłu spowodowało efekt remediacyjny przy największej zawartości cynku w glebie, a plon zwiększył się prawie trzykrotnie wobec obiektu z naturalną zawartością tego metalu w glebie. Plon korzeni mozgi obniżył się prawie czterokrotnie na glebie z największą zawartością cynku. Aplikacja pyłu skalnego do gleby w celach remediacyjnych obniżyła plon korzeni mozgi, z wyjątkiem obiektu z największą zawartością cynku, na którym – uległ 1,5-krotnemu zwiększeniu. Indeksy tolerancji (Ti) wyliczone dla części nadziemnej, wskazują przeważnie na lepszą tolerancję mozgi na zanieczyszczenie gleby cynkiem w pierwszym roku wegetacji niż w drugim. Korzystne działanie remediacyjne zastosowanego pyłu, ujawniło się w glebie o największym zanieczyszczeniu cynkiem, na której wartość indeksu (Ti) zwiększyła się około dwukrotnie, tak dla części nadziemnej, jak i dla korzeni mozgi.

Doktorant stwierdził zróżnicowane zawartości miedzi w biomasie części nadziemnych mozgi, zależnie od sezonu wegetacyjnego i jej pokosów, zanieczyszczenia gleby i aplikacji pyłu skalnego. Wykazał, że w pierwszym sezonie wegetacyjnym, zawartość miedzi była na podobnym poziomie w obu pokosach, a w drugim – wystąpiły większe różnice między pokosami. Dodatek pyłu skalnego w pierwszym roku uprawy wpłynął na niewielkie obniżenie tego pierwiastka w roślinach, a w następnym roku nie stwierdzono znaczących zmian. Korzenie mozgi zawierały więcej miedzi niż części nadziemne. Zawartość tego pierwiastka w korzeniach była około 2,5-krotnie większa na glebie z naturalną zawartością miedzi, a ponad 7-krotnie – na glebie silnie zanieczyszczonej Cu. Doktorant udowodnił, że pył skalny nie wpłynął znacząco na zmianę zawartości miedzi w korzeniach mozgi uprawianej na glebie o naturalnej zawartości tego pierwiastka, a zwiększył jej zawartość w korzeniach roślin, pochodzących z gleb silnie i bardzo silnie zanieczyszczonych.

Oceniał także zmiany rozkładu miedzi w roślinie na podstawie współczynnika translokacji (TF). Wartość TF była ponad dwukrotnie większa w korzeniach niż w części nadziemnej roślin, uprawianych na glebie o naturalnej zawartości Cu. Z powodu stresu z tytułu nadmiaru miedzi, mozga akumulowała ten pierwiastek głównie w korzeniach, ograniczając jego transport do części nadziemnej. Doktorant stwierdził po zastosowaniu pyłu stopniowe zmniejszenie współczynników bioakumulacji wraz z większym zanieczyszczeniem gleby miedzią. Wykazał, przy tym, że współczynniki bioakumulacji dla części nadziemnej były ponad sześciokrotnie mniejsze niż dla korzeni. Udowodnił więc niewielkie pobieranie miedzi z gleby, a gromadzenie jej głównie w korzeniach mozgi trzcinowatej. Aplikacja pyłu skalnego do gleby silnie zanieczyszczanej Cu, zwiększała wartość tego współczynnika dla korzeni w porównaniu do obiektu – bez stosowania pyłu. Doktorant wykazał, że remediacja pyłem skalnym, gleby silnie zanieczyszczonej miedzią, wpłynęła na obniżenie wartości współczynników bioakumulacji dla

części nadziemnej i korzeni w odniesieniu do współczynników, stwierdzonych w warunkach mniejszego zanieczyszczenia gleby miedzią.

Doktorant stwierdził również zmienność zawartości niklu w części nadziemnej mozgi w badanych sezonach wegetacyjnych, zależnie od stanu zanieczyszczenia gleby Ni, stosowania remediacji pyłem, a także zróżnicowanie w pokosach tej rośliny. Zawartość Ni w częściach nadziemnych mozgi, uprawianej na glebie o naturalnej i średnio zanieczyszczonej niklem, była zbliżona w obu pokosach pierwszego sezonu wegetacyjnego. Aplikacja pyłu skalnego do gleby spowodowała przy tym zanieczyszczeniu, zwiększenie średnich zawartości Ni w roślinach, ale różnice zaznaczyły się w poszczególnych pokosach. W drugim sezonie wegetacyjnym wystąpiły znaczne różnice Ni pomiędzy pokosami tej trawy. Na glebach o naturalnej zawartości Ni oraz o średnim i silnym zanieczyszczeniu, zawartości te były odpowiednio 4-krotnie 2-krotnie i 1,5-krotnie mniejsze w II pokosie niż w I. Dodatek pyłu skalnego do gleby średnio i silnie zanieczyszczonej niklem spowodował niewielkie jego zwiększenie w częściach nadziemnych mozgi. Doktorant stwierdził wielokrotnie większą zawartość niklu w korzeniach niż w częściach nadziemnych. Dodatek pyłu kamiennego zwiększył 5-krotnie zawartość Ni w korzeniach mozgi uprawianej na glebie o naturalnej jego zawartości. Współczynniki translokacji (TF) niklu, świadczą o większym zatrzymaniu niklu w korzeniach w porównaniu z częścią nadziemną mozgi, szczególnie przy większym zanieczyszczeniu gleby niklem. Aplikacja pyłu kamiennego do gleby obniżyła wartość współczynnika translokacji niklu w roślinach, uprawianych na glebie o naturalnej zawartości tego pierwiastka, a nieco zwiększyła – na glebach średnio i silnie zanieczyszczonych.

Na podstawie współczynników bioakumulacji niklu, obliczonych dla części nadziemnych i korzeni, wskazał na łatwość pobierania tego pierwiastka z gleby i gromadzenie go głównie w korzeniach roślin. Aplikacja pyłu na glebie średnio zanieczyszczonej niklem wpłynęła na zwiększenie wartości tego współczynnika dla części nadziemnej, a w znacznie większym stopniu dla korzeni w porównaniu do obiektów bez remediacji pyłem kamiennym. Obniżenie wartości współczynników bioakumulacji, tak dla części nadziemnych, jak i dla korzeni roślin, nastąpiło przy silnym zanieczyszczeniu gleby niklem niezależnie od aplikacji pyłu czy – pominięciu.

Doktorant wykazał, że cynk był znacznie łatwiej pobierany przez mózgę trzcinową w porównaniu do miedzi i niklu. Zaznaczyły się jednak różnice pomiędzy sezonami wegetacyjnymi, zanieczyszczeniem gleby Zn, a także pokosami tej rośliny. W pierwszym sezonie wegetacyjnym zawartość cynku w częściach nadziemnych była zróżnicowana pomiędzy pokosami, tak na glebie o naturalnej zawartości Zn, jak i średnio zanieczyszczonej i przyjmowała większe wartości w I pokosie mozgi. Średnia zawartość cynku z obu pokosów mozgi, pochodzącej z obiektów średnio zanieczyszczonych Zn (przy różnej jego zawartości w glebie), była od 15 do 57 razy większa niż – z gleby o naturalnej zawartości tego metalu. Aplikacja pyłu kamiennego, do gleby spowodowała zwiększenie cynku w częściach nadziemnych roślin uprawianych na glebach o naturalnej jego zawartości i najniższym poziomie zawartości – średniego zanieczyszczenia. W drugim sezonie wegetacyjnym, podobnie jak w pierwszym, stwierdził różnice w zawartościach cynku, pomiędzy pokosami lecz większe zawartości tego metalu występowały w II pokosie. Średnia zawartość cynku w obu pokosach mozgi, uprawianej na glebie średnio zanieczyszczonej Zn (przy różnych zawartościach Zn w glebie), była od 6 do 27 razy większa w porównaniu z zawartością cynku w roślinach, pochodzących z gleby o naturalnej zawartości cynku. Z badań tych wynika, że w pierwszym sezonie wegetacyjnym, zawartości cynku w biomasie mozgi, uprawianej na glebach zanieczyszczonych, były około dwukrotnie mniejsze. Aplikacja pyłu kamiennego do gleby słabiej zanieczyszczonej Zn wpłynęła na niewielkie zwiększenie zawartości cynku w części nadziemnej, a w przypadku – największego zanieczyszczenia Zn, spowodowała obniżenie średniej zawartości tego pierwiastka w roślinie.

Doktorant wykazał kilkakrotnie większą zawartość cynku w suchej masie korzeni w porównaniu do części nadziemnych. Aplikacja pyłu kamiennego do gleby nie wpłynęła na zmianę zawartości cynku w korzeniach roślin uprawianych na glebie z naturalną i podwyższoną zawartością tego pierwiastka. Z kolei w glebach o większej lub największej zawartości cynku, dodatek pyłu odpowiednio zwiększył zawartość tego metalu lub – zmniejszył w korzeniach mozgi. Doktorant stwierdził w oparciu o wartości współczynnika translokacji (TF), że roślina zgromadziła w korzeniach prawie dwukrotnie większą jego ilość niż w części nadziemnej, na glebie z naturalną i podwyższoną zawartością cynku. Przy większym i największym zanieczyszczeniu gleby cynkiem, zwiększył się stopniowo transport cynku z korzeni do części nadziemnych. Dodatek pyłu do gleby o naturalnej i podwyższonej zawartości Zn, spowodował niewielkie zwiększenie współczynnika translokacji.

Doktorant wykazał, że współczynnik bioakumulacji cynku, tak w częściach nadziemnych, jak i w korzeniach przeważnie zwiększał się pod wpływem zanieczyszczenia gleby cynkiem, a niekiedy i jej remediacji pyłem. Wyjątek stanowiła gleba o największej zawartości cynku, gdyż wówczas dodatek pyłu spowodował obniżenie współczynnika bioakumulacji, a tym samym ograniczone zostało pobieranie tego pierwiastka z gleby.

Doktorant badał również kształtowanie się makroelementów w roślinach uprawianych na glebach zanieczyszczonych miedzią, niklem i cynkiem oraz po ich remediacji pyłem kamiennym. Zawartość makroelementów w częściach nadziemnych mozgi na glebach zanieczyszczonych miedzią, niklem i cynkiem zmieniały się w niewielkim stopniu. Aplikacja pyłu kamiennego do gleb zanieczyszczonych tymi pierwiastkami wpłynęła niejednoznacznie na zawartość poszczególnych makroelementów: np. obniżenie zawartości fosforu i wapnia w roślinach na glebie silnie zanieczyszczonej miedzią; obniżenie na niektórych obiektach azotu, fosforu i magnezu, a wapnia – na wszystkich obiektach gleb zanieczyszczonych niklem. Jednak największe zmiany w zawartości makroelementów wystąpiły w roślinach uprawianych na glebach zanieczyszczonych cynkiem. Dotyczyły one zawartości: w częściach nadziemnych roślin, azotu, wapnia i fosforu, które przeważnie się zwiększały pod wpływem zanieczyszczenia cynkiem. Remediacja tych gleb pyłem kamiennym obniżyła średnio zawartości azotu, wapnia i magnezu w roślinach na wszystkich obiektach, fosforu – w roślinach uprawianych na glebie o największym zanieczyszczeniu cynkiem, a brak było wpływu tego zabiegu na zawartość potasu w częściach nadziemnych mozgi trzcinowatej.

Rozdział ten jest napisany poprawnie, a uzyskane wyniki badań są dobrze udokumentowane i zinterpretowane. Doktorant w tym rozdziale częściowo przedyskutował swoje wyniki i zacytował 12 pozycji literatury.

W rozdziale **Podsumowanie i dyskusja**, liczącym nieco ponad 6 stron, Doktorant zestawiał najważniejsze wyniki osiągnięte w swojej pracy i dokonał porównania z aktualną literaturą o tej problematyce. Rozdział ten podzielił na: „Wpływ pyłu na właściwości fizyczne i chemiczne gleby”, „Wpływ pyłu na tolerancję mozgi na metale”, „Wpływ pyłu na bioakumulację i translokację metali w roślinie” i „Wpływ pyłu na stan odżywiania mozgi makroelementami”.

Podkreślił, że dodatek pyłu kamiennego do gleby na poziomie $3\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, stanowił tylko 1% w stosunku do masy gleby, stąd też ocena wyników dla mieszanki z glebą z tak niskim udziałem pyłu jest przybliżona. Badania właściwości fizycznych pyłu i jego mieszanek z glebą, pozwalają oszacować, że ten 1% dodatku pyłu spowodował już zwiększenie powierzchni właściwej o 35%, a zmniejszanie jej porowatości. Zasadniczo to nie wpłynęło na zmianę właściwości powietrzno-wodnych gleby, lecz zmniejszyła się w niewielkim stopniu ilość wody bardzo łatwo dostępnej dla roślin.

Doktorant stwierdził zmniejszanie się wartości pH, (od 0,4 – Zn do 0,8 jednostki – Ni), wraz ze zwiększeniem się zawartości w glebie tych metali. Przypuszcza, że jest to związane z formą siarczanową metali, jaka została użyta w celu symulacyjnego zanieczyszczenia gleby.

Dodatek pyłu wpływał na dalsze zakwaszenie gleby, pomimo jego stanu zasadowego, przy czym największe było na glebach o naturalnej zawartości tych metali, a najmniejsze – na glebach najbardziej nimi zanieczyszczonych. Aplikacja pyłu kamiennego do gleby w celach remediacyjnych, obniżała w niewielkim stopniu pojemność sorpcyjną, niezależnie od stanu zanieczyszczenia gleby. Zmniejszyła się również zawartość metali w glebie, oznaczonych w 1M HCL, na glebach najbardziej zanieczyszczonych. Doktorant tą zależność uzasadnia zwiększeniem się powierzchni właściwej gleby i zatrzymaniem metali siłami adsorpcji, co ograniczyło ich rozpuszczalność.

Doktorant stwierdził, że mozga trzcinowata uprawiana na glebie zanieczyszczonej metalami reagowała najczęściej obniżeniem biomasy plonu części nadziemnej, ale i redukcją, a niekiedy wzrostem masy korzeni, zależnie od rodzaju metalu i jego zawartości w glebie. Roślina ta dobrze reagowała na zanieczyszczenie gleby miedzią ($251 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), o czym świadczy plon części nadziemnej – porównywalny z plonem uzyskanym z gleby naturalnie zanieczyszczonej i jeszcze większej masy korzeni. Z tego wynika, że miedź ma korzystny wpływ na wzrost i rozwój systemu korzeniowego mozgi. Bardzo silne zanieczyszczenie gleby miedzią oddziaływało toksycznie i hamowało wschody mozgi.

Zanieczyszczenie gleby niklem na poziomie średnim nie obniżyło plonu części nadziemnej i podobnie, jak w przypadku miedzi zaobserwowano zwiększenie masy korzeni. Reakcja roślin przy silnym zanieczyszczeniu gleby niklem była uzależniona od zawartości Ni w glebie. Obniżenie plonów części nadziemnych mozgi wystąpiło przy jego zawartości w glebie – $140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, bez większego wpływu na utratę masy korzeni. Zawartość niklu ($265 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), uniemożliwiła wschody roślin.

Zanieczyszczenie gleby cynkiem na poziomie średnim wpłynęło na wielkość plonów zależnie od zawartości tego metalu. Poziom zawartości cynku ($370 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) nie obniżył plonów części nadziemnej, przy jednoczesnym zwiększeniu masy korzeni, to potwierdza korzystny wpływ cynku na system korzeniowy roślin.

Doktorant wykazał, że przy większej zawartości cynku w glebie ($558 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), obniżyły się plony części nadziemnej mozgi bez wpływu na masę korzeni. Jeszcze większy poziom cynku w glebie ($690 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), spowodował znaczne ograniczenie masy części nadziemnej i korzeni. Rozkład plonów części nadziemnej i korzeni przy zanieczyszczeniu gleby badanymi metalami potwierdzały wartości współczynników tolerancji (Ti).

Zastosowanie pyłu kamiennego na glebę zanieczyszczoną metalami w ilości odpowiadającej $30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, tylko niekiedy przyniosło oczekiwany efekt remediacyjny, mierzony zwiększeniem tolerancji mozgi na metale. Stwierdził także istotną interakcję pomiędzy remediacyjnym oddziaływaniem odpadowego pyłu skalnego a stanem zanieczyszczenia gleby tymi metalami. Wykazał na glebie, o naturalnej zawartości metali, wystąpienie niekorzystnej tendencji działania pyłu na plon mozgi trzcinowatej. Niewielkie zanieczyszczenie gleby tymi pierwiastkami było dobrze tolerowane przez mozgę, bez aplikacji pyłu. Zastosowanie remediacji pyłem przy tym zanieczyszczeniu gleby obniżyło w niewielkim stopniu współczynnik tolerancji dla części nadziemnej, a jeszcze więcej dla korzeni. Pozytywne działanie pyłu kamiennego ujawniło się dopiero w warunkach większego zanieczyszczenia gleby tymi metalami.

Na podstawie wartości współczynników bioakumulacji dla części nadziemnej i korzenia wynika, że mozga najłatwiej pobierała cynk, następnie nikiel, a najtrudniej miedź. Zwiększenie poziomu zanieczyszczenia gleby cynkiem wpłynęło na łatwe jego pobieranie z gleby. W oparciu o wartości współczynników bioakumulacji stwierdził, że badane metale gromadzone są głównie w korzeniach. Proporcje rozmieszczenia tych mikroelementów pomiędzy częścią nadziemną a korzeniami różniły się zależnie od metalu i poziomu zanieczyszczenia.

Doktorant wykazał, że mózga przekazywała z korzeni do części nadziemnej najłatwiej cynk, natomiast nikiel, a szczególnie miedź zatrzymywała w korzeniach. Potwierdzają te zależności współczynniki translokacji (TF), obliczone dla poszczególnych metali.

Doktorant zwrócił uwagę, że rośliny o dużej biomase i współczynniku bioakumulacji dla części nadziemnej (powyżej 1), są odpowiednie do fitoekstrakcji. Z kolei rośliny tolerujące duże zawartości metali w glebie i współczynniku bioakumulacji dla korzeni (powyżej 1), a jednocześnie posiadające niski współczynnik translokacji (poniżej 1) są odpowiednie dla fitostabilizacji. Mózga spełniała warunki przydatności do fitoekstrakcji cynku z gleby oraz do fitostabilizacji gleby zanieczyszczonej niklem. Remediacja pyłem gleb zanieczyszczonych metalami modyfikowała w pewnym zakresie warunki pobierania metali, bowiem współczynniki bioakumulacji podlegały zmianom, a także współczynniki translokacji. Wykazał także ograniczające działania pyłu kamiennego na transport miedzi z korzeni do części nadziemnej, zwiększoną translokację niklu. Z kolei pył dodany do gleby powodował wzmocnienie cech przydatności mózgi do fitoekstrakcji cynku z gleby.

Doktorant stwierdził również, że wraz ze zwiększeniem się tych metali w glebie następowało na ogół podwyższenie makroelementów w roślinie, w tym również wapnia. Aplikacja pyłu do gleby wpływała na obniżenie składników pokarmowych w części nadziemnej mózgi, co mogło niekiedy wynikać ze zwiększonego plonu i z tym związanego „efektu rozcieńczenia”, jak również z powodu immobilizacji składników pokarmowych na cząstkach pyłu i ograniczonego ich pobierania.

Rozdział ten został opracowany syntetycznie i poprawnie. Spośród wielu, często zróżnicowanych wyników i zależności w powiązaniu z badanymi czynnikami, Doktorantowi udało się efektywnie dokonać dyskusji i podsumowania z wykorzystaniem 21 trafnie dobranych pozycji literatury.

Rozdział **Wnioski** jest odpowiedzią na postawione cele i tezy badawcze. Doktorant sformułował poprawnie 6 wniosków, które wynikają z przeprowadzonych dwuletnich badań polowych, badań laboratoryjnych i analizy statystycznej. Spośród nich, pierwsze trzy wnioski dotyczą poziomów tolerancji nadmiaru miedzi, niklu i cynku w glebie przez mózgę trzcinową, pobierania tych metali, a najłatwiej cynku i przydatności tej trawy do fitoekstrakcji tego metalu z gleby średnio nim zanieczyszczonej oraz spełnienia warunków przydatności mózgi w fitostabilizacji, lecz tylko w stosunku do gleby zanieczyszczonej niklem.

Kolejne trzy wnioski odnoszą się do wpływu pyłu kamiennego, wprowadzonego do gleby zanieczyszczonej metalami, na wybrane właściwości gleb, modyfikacji przez pył stopnia dostępności metali w glebie, ich fitoprzyswajalności i dystrybucji w roślinie oraz efektu mediacyjnego aplikacji pyłu do gleby, a także uzyskania pozytywnego efektu aplikacji pyłu do gleby zanieczyszczonej metalami w aspekcie zwiększenia tolerancji mózgi trzcinowatej na metale, ujawniającej się przy odpowiednio wysokim poziomie ich zawartości w glebie.

Doktorant wykazał się dużą starannością przy pisaniu mniejszej pracy doktorskiej, lecz nie ustrzegł się usterek, które są nieliczne, ale wymagają zwrócenia uwagi przy przygotowaniu publikacji naukowych na bazie zaprezentowanych wyników badań.

Oto niektóre z nich:

str. 6 w.6 od dołu, błąd w nazwisku;

str. 13 w.6 od góry, powinno być: kwaśnego i lekko kwaśnego odczynu.

W licznych opisach zależności lepiej używać: zamiast najniższa – najmniejsza, a zamiast najwyższa – największa oraz niezbyt zrecznie brzmią tu słowa: spadek – lepiej obniżenie, obniżka, a niekiedy zamiast wzrost – lepiej zwiększenie (str. 36, 49, 54, 57 – np. w.5 pod tab. 25 i str. 58, 59, 62). Brakujące znaki interpunkcyjne zaznaczyłam w tekście pracy. Te usterki są nieliczne i nie obniżają wartości merytorycznej pracy, a także jej oceny.

Wniosek końcowy

Rozprawę doktorską mgr inż. Marka Jakubowskiego oceniam pozytywnie. Spełnia ona wymogi stawiane dobrym pracom doktorskim. Przygotowanie eksperymentu i wykonanie go wymagało od Niego licznych umiejętności, tak do prowadzenia doświadczenia polowego, jak i do wykonania wielu skomplikowanych analiz chemicznych, statystycznej oceny wyników badań oraz zgromadzenia i opracowania literatury, w tym prawie 50% w języku angielskim. Przeprowadzenie tych badań, zebranie literatury i opracowanie wyników wiązało się także z dużym nakładem czasu pracy.

Badania obejmowały szeroki zakres: analizę właściwości fizycznych i chemicznych zanieczyszczonej metalami (Cu, Ni, Zn) gleby, ocenę składu chemicznego pyłu zastosowanego do remediacji gleby zanieczyszczonej w różnym stopniu, miedzią, niklem i cynkiem oraz wpływ pyłu na niektóre właściwości gleby, a także wpływ zanieczyszczenia gleby metalami na plon biomasy nadziemnej i korzeni mozgi trzcinowatej, zawartości i bioakumulacji badanych metali, ocenę ich pobierania i przemieszczania w roślinie. Uwzględnił również wpływ zanieczyszczenia gleby tymi metalami na zawartość makroelementów w roślinie.

Doktorant ocenił także mozgę trzcinowatą, uprawianą w warunkach zanieczyszczenia gleby miedzią, niklem i cynkiem w aspekcie jej przydatności do fitoekstrakcji i fitostabilizacji w stosunku badanych metali. Wyznaczył także poziomy zawartości tych metali w glebie lekkiej, które były toksyczne dla wzrostu i rozwoju mozgi trzcinowatej. Są to ważne osiągnięcia Doktoranta wzbogacające wiedzę w tej problematyce.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgr Marka Jakubowskiego, spełnia warunki stawiane pracom doktorskim zawarte w ustawie z dnia 14 marca 2013 roku „o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz.U. Nr 65 z 2003 r. poz. 595 z późniejszymi zmianami) oraz zawiera się w dziedzinie nauk rolniczych, dyscyplina naukowa – ochrona i kształtowanie środowiska, specjalność – chemia rolna i kształtowanie środowiska.

Stawiam wniosek do Wysokiej Rady Naukowej IUNG-PIB w Puławach o dopuszczenie Pana mgr inż. Marka Jakubowskiego do procedowania dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Rzeszów 23.01.2019 r.

