

Prof. dr hab. Alicja Pecio
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB w Puławach

Puławy, 12.09.2022 r.

Recenzja
Rozprawy Doktorskiej mgr. inż. Elżbiety Bodeckiej
pt.: „Wykorzystanie informacji o przestrzennej zmienności pól do określenia
efektywności zastosowania zmiennej dawki azotu w uprawie pszenicy ozimej”

Rozprawa doktorska została wykonana w Instytucie Rolnictwa Szkoły Głównej
Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Promotor: dr. hab. Stanisław Samborski, prof. SGGW

Podstawa opracowania

Recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo PW.IR.20.2022 z dnia 28 lipca 2022 r. skierowane przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo dr hab. Łukasza Uzarowicza, prof. SGGW.

1. Ocena wyboru problematyki badawczej

Wśród zabiegów agrotechnicznych istotne miejsce w procesie produkcji roślinnej zajmuje nawożenie. Największy udział w nawożeniu mają nawozy azotowe, które stanowią około 40% kosztów ponoszonych ogółem na nawożenie pszenicy i rzepaku ozimego w naszym kraju. Azot, poza dostępnością wody dla roślin, jest najbardziej plonotwórczym czynnikiem w produkcji roślinnej. Jednakże efektywność wykorzystania azotu z nawozów przez rośliny uprawne nie jest wysoka i wynosi według różnych autorów od 20 do 70%, a w przypadku zbóż rzadko przekracza 50%. Powodem są straty, jakim ulega ten pierwiastek w wyniku złożonego cyklu przemian w środowisku gleba-roślina. Stąd poprawa stopnia wykorzystania azotu z nawozów staje się coraz ważniejszym elementem agrotechniki.

Wysoka efektywność nawożenia azotem jest bardzo ważna również ze względów środowiskowych, gdyż azot niewykorzystany przez rośliny przyczynia się do eutrofizacji środowiska wodnego (N-NH₃) i jest źródłem emisji gazów do atmosfery (N-NH₄).

Jedną z nowoczesnych metod, która ma na celu m.in. poprawę efektywności wykorzystania azotu z nawozów jest stosowanie zmiennej dawki tego składnika, czyli dopasowanie jej do aktualnego, zróżnicowanego w obrębie pola uprawnego, zapotrzebowania roślin na ten składnik. Metoda ta, umożliwia w każdym miejscu pola uwzględnienie zróżnicowanej przestrzennie ilości mineralnego azotu glebowego (N_{min}) dostępnego dla roślin, wielkości pobrania azotu przez rośliny, reakcji roślin na zastosowany nawóz azotowy oraz potencjału plonowania roślin w obrębie pola, który wynika głównie ze stosunków wodno-powietrznych w glebie. Dlatego stosowanie jednolitej dawki azotu na całym polu, niedostosowanej do zróżnicowanych przestrzennie aktualnych potrzeb roślin,

może prowadzić do strat tego składnika, a następnie do negatywnego wpływu azotu na środowisko.

Wobec uwagi nakierowanej na związki rolnictwa z jakością środowiska oraz na stale rosnące koszty produkcji rolnej, nawożenie precyzyjne wzbudza coraz większe zainteresowanie. Dzieje się tak również dlatego, gdyż wpisuje się ono w kluczową problematykę bezpośrednio związaną z kwestiami ogólnoswiatowymi, takimi jak zrównoważone rolnictwo i bezpieczeństwo żywnościowe. Promowanie rolnictwa precyzyjnego jest konieczne w celu przezwyciężenia szeregu wyzwań gospodarczych i środowiskowych oraz zapewnienia zrównoważonego rozwoju i ekologicznego wzrostu.

W tym sensie recenzowana praca, która włącza się w poszukiwania możliwości zwiększenia efektywności wykorzystania azotu, jest odpowiedzią na te właśnie wyzwania. Praca Pani mgr Elżbiety Bodeckiej jest interesująca i ważna zarówno w ujęciu poznawczym, jak i utylitarnym dla współczesnego rolnictwa.

2. Formalna ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny praca obejmuje 162 strony. Jest napisana w układzie typowym i ogólnie przyjętym dla tego typu opracowań naukowych, zawiera 38 tabel oraz 26 rysunków.

W treści ocenianej rozprawy Autorka wydzieliła następujące rozdziały: Wstęp, Przegląd literatury, Materiał i metody, Wyniki badań i dyskusja, Wnioski, Spis literatury, Netografia, Aneks, Spis tabel i rysunków. Na początku pracy przed spisem treści, zamieściła streszczenie w języku polskim i angielskim, a po nim – bardzo cenny spis stosowanych skrótów i oznaczeń. Układ pracy jest jasny i logiczny, a kolejność rozdziałów z wyodrębnionymi podrozdziałami jest właściwa. Praca napisana jest poprawnym językiem, od strony edytorskiej nie budzi większych zastrzeżeń. Tabele i rysunki zostały przygotowane w sposób przejrzysty i czytelny.

3. Merytoryczna ocena rozprawy doktorskiej

Początkowe rozdziały pracy tj. Wstęp i Przegląd literatury dobrze wprowadzają w tematykę badawczą i przybliżają zagadnienia, którymi Pani dr Elżbieta Bodecka interesowała się planując swoje badania.

Rozdział **Wstęp** stanowi krótkie (2 strony), ale jasne wprowadzenie czytelnika do zawartości pracy. Doktorantka po krótko uzasadniła w nim potrzebę przeprowadzenia przedstawionych w rozprawie badań, ich cele oraz hipotezę badawczą. Zwróciła uwagę na bardzo słabą efektywność wykorzystania azotu przez rośliny zbożowe, co skłania do poszukiwania metod, które mogłyby ograniczyć straty tego składnika do środowiska, ograniczyć jego dawki bez straty plonów uprawianych roślin lub wpłynąć na zwiększenie plonów bez zwiększenia dawek nawożenia. Słusznie zauważyła, że efektywność wykorzystania azotu jest zróżnicowana nie tylko pomiędzy polami, ale także wewnątrz pól ze względu na ich zmienność wewnętrzną, a także pomiędzy latami, w wyniku zróżnicowania warunków pogody. Jedną z metod poprawy efektywności wykorzystania

azotu jest stosowanie jego zmiennej dawki, dostosowanej do zmienności pola i do aktualnych, również zróżnicowanych przestrzennie potrzeb nawożenia.

Na podstawie przeglądu dostępnej literatury Doktorantka uznała, że do tej pory nie badano efektywności wykorzystania zmiennej dawki azotu na dużych polach uprawnych w powiązaniu z przestrzennym zróżnicowaniem zawartości azotu mineralnego w glebie i stanu roślin w łanie i na tej podstawie sformułowała cele swoich badań, a następnie wyjaśniła ich podstawę naukową w formie hipotezy badawczej.

Zarówno cele badań, jak i hipoteza badawcza zostały sformułowane w trzech jasno i precyzyjnie określonych punktach, są właściwe merytorycznie i wskazują na przeprowadzenie przez Autorkę wnikliwej oceny aktualnego stanu wiedzy, dotyczącego różnego rodzaju uwarunkowań wykorzystania azotu przez rośliny uprawne, w tym zmienności pola. W takim sensie potwierdzam ich poprawność.

Niestety jednak Doktorantka popełniła pewne błędy, które powtarzają się wielokrotnie w treści całej pracy. W moim rozumieniu, zastosowała skrót myślowy, w których błędnie określa wskaźniki roślinne jako „destrukcyjne i niestrukcyjne” oraz stan odżywienia roślin azotem jako „odżywienie azotem”. W pierwszym przypadku błąd wynika stąd, że destrukcyjne lub nie destrukcyjne są raczej metody określania wartości wskaźników, a nie same wskaźniki. W drugim przypadku chodzi o bieżący, aktualny status odżywienia roślin tym składnikiem, wyrażony konkretnymi liczbami, dlatego też bardziej poprawną wydaje się forma „stan odżywienia roślin azotem”.

Przegląd literatury Doktorantka przygotowała w sposób obszerny i wyczerpujący potrzebę merytorycznego uzasadnienia podjętej tematyki badawczej. Zajmuje 27 stron i składa się z 10 podrozdziałów, w których Autorka wyodrębniła istotne dla problematyki pracy zagadnienia.

W pierwszej kolejności wyjaśniła zatem na czym polega rolnictwo precyzyjne i zwróciła uwagę, że podstawą jego wdrażania jest zmienność gleby, która musi być zidentyfikowana i określona ilościowo. Dopiero na tej podstawie możliwe jest efektywne dostosowanie zabiegów agrotechnicznych.

W dalszej części Autorka określiła wymagania glebowe pszenicy ozimej oraz scharakteryzowała wskaźniki jakości gleb, zmienność przestrzenną i sposoby jej oceny. Zwróciła uwagę, że badanie wpływu zmienności gleby w doświadczeniach polowych jest niezbędne do prawidłowej interpretacji wpływu wielu czynników na rośliny uprawne. Oceny zmienności glebowej dokonuje się w sposób punktowy lub ciągły. Z punktu widzenia rolnictwa precyzyjnego ważne są pomiary ciągłe, wykonywane w czasie przejazdu maszyn rolniczych, także w trakcie wykonywania prac polowych.

Podkreśliła również znaczenie mapowania plonów w trakcie przejazdu kombajnu, które jest jednym z podstawowych i najważniejszych elementów systemu rolnictwa precyzyjnego, dostarczających informacji o zmienności plonowania w obrębie pola. Dane pozyskane z systemu mapowania plonu uzasadniają stosowanie zmiennej dawki nawożenia mineralnego

w obrębie pól, w tym zróżnicowanych dawek nawożenia azotem, co może przyczyniać się do większej efektywności wykorzystania tego składnika z nawozów.

Istotny fragment rozdziału Przegląd literatury dotyczy metod oceny stanu odżywienia roślin azotem, z podziałem na metody destrukcyjne i metody niedestrukcyjne. Pierwsze z wymienionych wymagają pobierania próbek roślin, a następnie wykonania analiz laboratoryjnych, co jest czasochłonne, pracochłonne i kosztowne. Z tego też względu mają mniejsze zastosowanie w rolnictwie precyzyjnym. Znajdują natomiast zastosowanie w obliczeniach efektywności wykorzystania składników nawozowych, w tym azotu, który jest ważnym wskaźnikiem przy ocenie zrównoważenia produkcji roślinnej, zarówno pod względem produkcyjno-ekonomicznym, jak i środowiskowym. Metody destrukcyjne mają też zastosowanie w ocenie stanu odżywienia roślin azotem za pomocą wskaźnika NNI (*Nitrogen Nutrition Index*), który nie jest jednak wykorzystywany przez rolników.

Do oceny stanu odżywienia roślin azotem poszukuje się metod niedestrukcyjnych, które wykorzystują pomiary ilości promieniowania elektromagnetycznego, o danej długości fali, które zostało pochłonięte lub odbite od łąnu roślin. Wyniki pomiarów są wyrażane w postaci wskaźników roślinnych, tj. NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDRE (*Normalized Difference Red Edge Vegetation Index*), który jest przydatny do monitorowania stanu gęstych łąn roślin, LAI (*Leaf Area Index*) i SPAD. Autorka zwróciła uwagę na zależności pomiędzy wskaźnikami roślinnymi a plonem i jakością ziarna.

W kolejnym podrozdziale Doktorantka zwróciła uwagę, że w produkcji zbóż najczęściej stosuje się nawożenie stałą dawką azotu, z uwzględnieniem średniego dla pola przewidywanego plonu ziarna. Jednakże słusznie zauważyła, że prawidłowe wyznaczenie optymalnej dawki tą metodą jest bardzo trudne. Bardziej dokładnym sposobem jest różnicowanie dawki tego składnika w obrębie pola zależnie od zmienności potencjału plonowania roślin w latach poprzednich lub aktualnego zapotrzebowania roślin na ten składnik, czyli wysiew zmiennej dawki N (*VRA-variable rate application*) w celu osiągnięcia potencjalnego, przestrzennie zróżnicowanego plonu, optymalizacji zysku z uprawy oraz zwiększenia wykorzystania azotu.

Według Doktorantki podstawowym sposobem oceny efektywności stosowania zmiennej dawki azotu jest ocena plonowania roślin oraz zużycia nawozu. Znacznie rzadziej wykorzystuje się wpływ tej metody nawożenia azotem na jakość plonu oraz inne wskaźniki, jak np. bilans azotu.

W mojej ocenie rozdział jest napisany bardzo dobrze, a dobór cytowanych prac do poruszanych aspektów merytorycznych rozprawy jest odpowiedni i poprawny. Autorka wykorzystowała najważniejsze publikacje związane z tematem dysertacji, na które składają się publikacje zamieszczone w fachowych czasopismach naukowych, w tym o zasięgu światowym.

W rozdziale **Material i metody** Doktorantka bardzo dokładnie opisała warunki glebowe i warunki pogody w poszczególnych lokalizacjach, sposób zakładania i prowadzenia

doświadczeń, badane wskaźniki glebowe i roślinne oraz zastosowane metody ich wyznaczania i analizy. Rozdział jest bardzo obszerny i zajmuje 32 strony.

Badania wykonane przez Panią mgr Elżbietę Bodecką, zgodnie z przyjętymi celami badań, obejmowały ocenę efektywności stosowania zmiennej dawki azotu, właściwości gleby i stanu odżywienia roślin azotem oraz plonu ziarna, jego składowych i jakości ziarna.

Na uwagę zasługują zastosowane w badaniach destrukcyjne i niestrukcyjne metody wyznaczania analizowanych wskaźników. Metodami destrukcyjnymi określano właściwości gleby i wskaźniki roślinne, w wyznaczonych wcześniej stałych miejscach pobierania próbek. Pomiarów roślin metodami niestrukcyjnymi, czyli bez pobierania próbek, wykonywano w sposób ciągły i z dużą częstotliwością na całej powierzchni pasów doświadczalnych, przeznaczonych do nawożenia zmienną dawką azotu oraz punktowo w miejscach pobierania próbek.

Opis metodyki badań wskazuje na poprawne zaplanowanie i wykonanie badań.

W rozdziale **Wyniki badań i dyskusja** Doktorantka przedstawiła wyniki badań własnych, które jednocześnie konfrontowała i komentowała w oparciu o dostępną literaturę. Dokonała tego w układzie dwóch części, z których pierwsza obejmowała wyniki doświadczeń założonych w układzie pasów, a druga – wyniki doświadczeń z punktami pomiarowymi zlokalizowanymi w obszarach badanych pól o różnym potencjale plonowania.

W części I, która zajmuje 24 strony maszynopisu, Autorka realizowała przedstawiony w rozdziale Wstęp pierwszy cel badań, jakim była ocena efektywności stosowania zmiennej dawki azotu, wyliczonej na podstawie wartości wskaźników roślinnych, które charakteryzują wielkość i zieloność ładu. W wyniku przeprowadzonych badań Doktorantka nie wykazała istotnego wpływu stosowania zmiennej dawki azotu na badane parametry, co jednak bardzo dobrze przedyskutowała i wyjaśniła z wykorzystaniem dostępnej literatury.

Wykazała niejednoznaczny wpływ nawożenia zmienną dawką N na zużycie nawozu, które jest najlepszą oceną efektywności tego sposobu nawożenia. Słusznie wyjaśniała, że korzyści wynikające ze stosowania zmiennej dawki N nie zawsze wyrażają się zmniejszonym zużyciem tego składnika w porównaniu do dawki stałej. Zastosowanie zmiennej dawki azotu na polu o dużej zmienności ładu roślin może prowadzić nawet do zastosowania dawek wyższych. Z drugiej jednak strony, może doprowadzić też do redystrybucji tego składnika w obrębie pola, tzn. na obszarach pola o mniejszym zapotrzebowaniu roślin na azot będą stosowane niższe dawki i odwrotnie, tam gdzie zapotrzebowanie jest większe dawki będą wyższe. Taki sposób nawożenia azotem może przyczynić się do ograniczenia strat azotu, lepszego wykorzystania potencjału plonotwórczego różnych fragmentów pola i ograniczenia zróżnicowania plonu roślin w obrębie całego pola.

Sposób nawożenia azotem pszenicy ozimej nie miał też istotnego wpływu na plon ziarna pszenicy ozimej. Ograniczony był również wpływ sposobu nawożenia azotem na zawartość białka w ziarnie i wskaźnik sedimentacji Zeleny'ego. Jako prawdopodobną przyczynę Doktorantka uznała niedoskonałość algorytmu wyliczania zmiennej dawki azotu na

podstawie wskaźników roślinnych NDVI i NDRE, który niewystarczająco dobrze dostosowuje dawkę N do potrzeb roślin. Właściwe dostosowanie dawki azotu do potrzeb roślin może być utrudnione również w warunkach ograniczonych możliwości roślin do pobierania tego składnika ze względu na niedobory wody. Zatem zwiększenie dawki azotu w takich obszarach pola może nie skutkować wzrostem plonu ziarna czy zawartości w nim białka.

Na żadnym z badanych pól Autorka nie stwierdziła też istotnego wpływu sposobu nawożenia N na wartość bilansu azotu i wykazała, że liczba punktów o ujemnym bilansie azotu w dużo większym stopniu zależała od samego pola. Aczkolwiek spodziewała się, że zastosowanie zmiennej dawki azotu powinno zmniejszyć wartość bilansu N, gdyż celem jej stosowania jest dobór dawki N do aktualnych potrzeb roślin. Doktorantka wyjaśniła przy tym, że ujemne wartości bilansu oznaczają, że w danym miejscu na polu rośliny pobrały większą ilość azotu z wytworzonym plonem ziarna i słomy niż łączna ilość azotu potencjalnie dostępna dla roślin. Wynika to prawdopodobnie z intensywnej mineralizacji materii organicznej i uwalniania z niej azotu dla roślin. Wówczas rośliny mogą pobrać więcej azotu niż dostarczono w nawozach i stwierdzono jako N_{min} przed zastosowaniem azotu mineralnego wiosną. Zatem takie obszary pola o ujemnym bilansie N (charakteryzujące się brakiem nadwyżki azotu) można uznać za najmniej narażone na straty azotu.

Doktorantka nie stwierdziła również istotnego wpływu stosowania zmiennej dawki azotu na poprawę efektywności wykorzystania azotu z nawozów, ocenianą jako produktywność 1 kg azotu. Na jednym z pól wykazała nawet wyższą efektywność wykorzystania N z nawozu na produkcję ziarna po zastosowaniu stałej dawki azotu. Autorka przytoczyła badania innych autorów, którzy podają, że efektywność wykorzystania azotu zależy od wielu czynników, w tym czynników genetycznych, środowiskowych, agrotechnicznych i ich współdziałania oraz od synchronizacji pomiędzy ilością azotu dostępną dla roślin z różnych źródeł i ich zapotrzebowaniem na ten składnik.

Część II zajmuje nieco ponad 23 strony maszynopisu. Autorka realizowała tu dwa pozostałe z wymienionych w rozdziale Wstęp cele badawcze. W ramach pierwszego z nich przedstawiła ocenę przestrzennego zróżnicowania zawartości azotu mineralnego w glebie, wskaźników stanu odżywienia roślin azotem, a także zróżnicowania plonu pszenicy ozimej i jego składowych oraz wskaźników jakości ziarna. Na uwagę zasługuje fakt, iż ze względu na duże zróżnicowanie bilansu azotu, niezależne od sposobu stosowania tego składnika, Doktorantka zaproponowała cenną modyfikację algorytmu wyliczania zmiennej dawki N, uwzględniającą, poza oceną stanu łanu, także dostępność wody dla roślin uwarunkowaną przebiegiem pogody oraz zróżnicowaniem warunków glebowych i topografii w obrębie pola. Byłoby to korzystne z punktu widzenia ograniczenia strat azotu do środowiska.

W ramach realizacji drugiego z wymienionych celów badań Autorka przedstawiła ocenę zależności między badanymi właściwościami gleby i roślin. Na podstawie charakterystyki przestrzennej zmienności badanych pól wykazała słaby związek obsady roślin z ilością N_{min} w glebie. Potwierdziła również dużą przydatność określanych zdalnie wskaźników

NDVI i NDRE do oceny stanu odżywienia roślin azotem, które wykazywały silniejszy związek z plonem pszenicy niż wskaźniki wyznaczone metodami destrukcyjnymi.

Prezentowane wyniki są wartościowe i wiarygodne, nakierowane na realizację zaplanowanych celów badań. Brakuje mi jednak jasnego odniesienia się do postawionej hipotezy badawczej, a szczególnie do jej punktu trzeciego, w którym jest mowa o prognozowaniu wartości wskaźników na podstawie znajomości jednego ze wskaźników dostępności azotu dla roślin lub stanu odżywienia tym składnikiem. W moim rozumieniu Autorka ograniczyła się tylko do przedstawienia zależności korelacyjnych, które mogą stanowić jedynie przesłankę do podjęcia próby prognozowania. Aby stwierdzić możliwość samego prognozowania należałoby przedstawić dodatkowe analizy statystyczne.

Wnioski końcowe są zgodne z celami badań i zostały ujęte w 13 punktach. Uważam jednak, że jest ich zbyt dużo i stanowią raczej podsumowanie wyników badań. W moim rozumieniu, powinny stanowić ustosunkowanie się do hipotezy badawczej i zawierać związane odpowiedzi na postawione szczegółowe cele badań, bez potrzeby wnikania w opisy wyników i wyjaśniania przyczyn ich uzyskania. Stąd przy dalszym redagowaniu pracy do druku warto byłoby je nieco uprościć.

Spis literatury obejmuje 299 pozycji. Należy podkreślić znaczny udział (54%) publikacji angielskojęzycznych oraz duży udział (33%) pozycji literatury wydanej w ostatnich 10 latach. Jest to bardzo bogaty zbiór dobrze dobranej literatury tematu, zawierający ogrom wiedzy, z którą Doktorantka zapoznała się, przeanalizowała i przytoczyła w swoich rozważaniach.

4. Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska dotyczy ważnego zagadnienia i stanowi ciekawe, wieloaspektowe studium badawcze. Posiada walory zarówno naukowe, jak i poznawcze. Opracowana na podstawie dobrze przemyślanych i przeprowadzonych doświadczeń polowych rozmieszczonych w różnych rejonach kraju wskazuje na dobre przygotowanie i dużą samodzielność Doktorantki w planowaniu i prowadzeniu badań oraz analizie i interpretacji uzyskanych wyników. Zamieszczone powyżej uwagi stanowią jedynie sugestie Recenzenta, które nie mają znaczącego wpływu na ogólną pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej.

Zaprezentowane w pracy wyniki wnoszą istotny wkład w badania nad zwiększeniem efektywności wykorzystania azotu z nawozów, ograniczeniem jego strat i negatywnego wpływu na środowisko oraz w rozwój i wdrażanie zasad rolnictwa precyzyjnego.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Elżbiety Bodeckiej pt.: "Wykorzystanie informacji o przestrzennej zmienności pól do określenia efektywności zastosowania zmiennej dawki azotu w uprawie pszenicy ozimej" spełnia wszystkie wymagania stawiane tego typu pracom, określone w ustawie z 14 marca 2003 roku. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 poz. 1789).

Wnoszę zatem do Rady Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo SGGW w Warszawie o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Pani mgr inż. Elżbiety Bodeckiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ogrom pracy włożonej w przeprowadzenie badań, ich kompleksowość oraz aktualność problematyki badawczej, jak też staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej skłaniają mnie do zaproponowania Radzie Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo SGGW w Warszawie wyróżnienia Pani mgr inż. Elżbiety Bodeckiej stosowną nagrodą.

Prof. dr hab. Alicja Pecio